

Universidade Federal de Santa Catarina  
Centro Tecnológico  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química

*ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE TRANSIENTES  
DE PRESSÃO EM POLIDUTOS COM VAZAMENTO:  
UM ESTUDO UTILIZANDO DADOS DE SIMULAÇÃO*

*Dissertação apresentada ao  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Química da  
Universidade Federal de Santa Catarina  
como requisito parcial para obtenção  
do título de mestre  
em Engenharia Química  
Orientador Prof. Dr. Nestor Roqueiro*

*AUDREI GIMÉNEZ BARAÑANO*

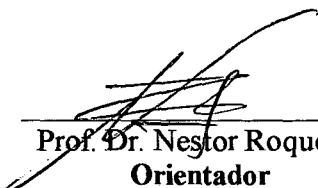
Florianópolis – SC  
2001

# **Análise do Comportamento de Transientes de Pressão em Polidutos com Vazamento: Um Estudo Utilizando Dados de Simulação**

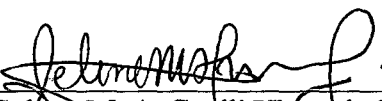
Por

**Audrei Giménez Barañano**

Dissertação julgada para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Química**, área de concentração **Desenvolvimento de Processos Químicos e Biotecnológicos** e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Santa Catarina.

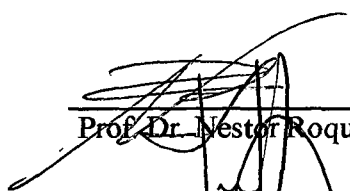


Prof. Dr. Nestor Roqueiro  
**Orientador**

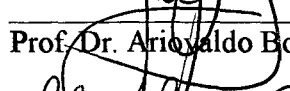


Prof.ª Dr.ª Selene M. A. Guelli Ulson de Souza  
**Coordenadora do CPGENQ**

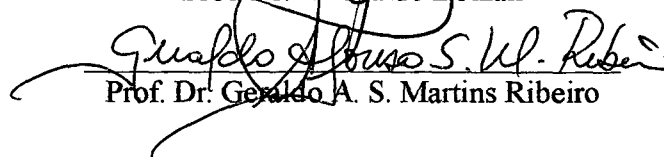
**Banca Examinadora:**



Prof. Dr. Nestor Roqueiro



Prof. Dr. Ariovaldo Bolzan



Prof. Dr. Geraldo A. S. Martins Ribeiro

**Florianópolis, 23 de Fevereiro de 2001**

## **AGRADECIMENTOS**

Meus sinceros agradecimentos àqueles que em mim depositaram confiança e contribuíram para a realização deste trabalho:

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Nestor Roqueiro, por todo o seu incentivo, dedicação e paciência.

Um agradecimento especial ao engenheiro Renan Martins Baptista (PETROBRAS/CENPES), pelo auxílio e esclarecimentos que muito contribuíram neste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, contribuindo para este trabalho.

À CAPES pelo apoio financeiro.

Aos amigos do mestrado Alexandra, Jean, Márcio, Marcos, Mires, Ricardo, Cris e Cláudia, pelo companheirismo e amizade.

Aos amigos do LCP, Ricardo, Mazzucco, Caio, Carlson, Henry, Neves, Juan, Cíntia, Fernanda, Lia e Cíntia pela amizade e contribuição.

Ao secretário da coordenadoria do CPGENQ, Edivilson, pela atenção e auxílio.

Aos meus pais, Flávio e Helena, e meu irmão Christian por terem sempre me incentivado a estudar e pelo apoio incondicional.

Ao Dorival, por seu amor, amizade e companheirismo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa.

A Deus.

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo apresentar o comportamento da pressão em um duto com vazamento. Primeiramente, configurou-se um duto com elevações em um simulador de escoamento de líquidos e, a partir do monitoramento de um único ponto de pressão, caracterizou-se o efeito de vazamentos simulados em várias posições ao longo do duto. Foram utilizadas quatro diferentes vazões vazadas em cada posição. Foram escolhidos três fluidos diferentes para as simulações, óleo diesel, gasolina e GLP. Isto foi feito, a fim de representar o escoamento de derivados de petróleo com características operacionais bastante diversas. Foram obtidas curvas relacionando a queda de pressão e o tempo para os três fluidos e as quatro vazões vazadas, bem como as curvas de aproximação. Esse comportamento foi caracterizado através de análise qualitativa, cálculos do ganho e constantes de tempo durante o evento de vazamento. Com isso, observou-se grande semelhança e proporcionalidade nas assinaturas de pressão para os três fluidos utilizados.



## **ABSTRACT**

This work has the purpose to present the transient pressure behavior in a leaking pipeline. First, a pipeline was configured in a fluid flow simulator and, by monitoring the pressure at a point, the simulated leakage effects were characterized in several positions through the pipeline. Four different leakage flowrates were tested for each position. Three different fluids were chosen for the simulations: diesel oil, gasoline and liquefied petroleum gas. These fluids were chosen to represent the flow of petroleum by products with different operational characteristics. As a result, curves relating the pressure fall with time were obtained for the three fluids and the four leakage flowrates, as well as approximation curves. This behavior was characterized through qualitative analysis, and by determining the gain and time constants during the event of leakage. According to these results, it was observed a great similarity and proportionality in pressure signatures for the three fluids tested.

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>3</b>
2.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS APLICADOS À DETECÇÃO DE VAZAMENTOS .....	3
2.1.1 <i>Conservação da massa</i> .....	3
2.1.2 <i>Conservação da energia</i> .....	4
2.2 ESTADO DA ARTE DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS .....	6
2.2.1 <i>Balanço Volumétrico (RTM)</i> .....	7
2.2.2 <i>Métodos baseados em modelo transiente (RTTM)</i> .....	11
<i>Análise de Desvio</i> .....	14
<i>Balanço volumétrico compensado</i> .....	16
2.2.3 <i>Sistema de detecção de vazamentos utilizando medidas de pressão</i> .....	18
2.2.4 <i>Método experimental</i> .....	24
2.3 SOFTWARE COMERCIAL DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS .....	29
2.4 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS .....	33
<b>3 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR .....</b>	<b>34</b>
3.1 SIMULADOR LIQNET .....	34
3.2 CÁLCULOS HIDRÁULICOS DO DUTO .....	37
3.3 ESTRUTURA DO MODELO DO LIQNET .....	38
3.4 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO .....	39
3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS DE TUBULAÇÃO .....	41
3.5.1 <i>O modelo em regime permanente não converge</i> .....	41
3.6 ALGUNS PROBLEMAS ENCONTRADOS .....	43
3.7 KELLER BOX E MODIFIED BOX METHODS .....	44
3.8 EQUAÇÕES UTILIZADAS PELO LIQNET .....	45
3.8.1 <i>Densidade</i> .....	45
3.8.2 <i>Viscosidade</i> .....	46
3.8.3 <i>Calor específico</i> .....	46
3.8.4 <i>Módulo de Bulk</i> .....	46
3.8.5 <i>Coefficiente de expansão térmica</i> .....	47
3.8.6 <i>Equações de vazão da tubulação</i> .....	47
<b>4 CARACTERIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES .....</b>	<b>53</b>
4.1. FLUIDOS .....	53
4.2. DUTO .....	54
4.3. ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO .....	56
4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO .....	57
4.5. DEFINIÇÕES DE RESOLUÇÃO .....	57
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>58</b>
5.1 APRESENTAÇÃO .....	58
5.2 RESULTADOS PARA ÓLEO DIESEL .....	59

5.2 RESULTADOS PARA A GASOLINA .....	62
5.3 RESULTADOS PARA GLP .....	65
5.5 ANÁLISES DIVERSAS .....	68
<b>6 CONCLUSÃO .....</b>	<b>83</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>85</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 2. 1 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA CONSERVAÇÃO DA MASSA.....	3
FIGURA 2. 2 – MODELAGEM ADAPTATIVA.....	13
FIGURA 2. 3 – DIAGRAMA DE MODELO DE DETECÇÃO DE VAZAMENTO BASEADO NA VAZÃO .....	14
FIGURA 2. 4 – ANÁLISE DO DESVIO .....	15
FIGURA 2. 5 – COMPORTAMENTO DA PRESSÃO E VAZÃO SOB O TRANSIENTE DO VAZAMENTO .....	16
FIGURA 2. 6 – COMPORTAMENTO DA PRESSÃO E VAZÃO SOB O TRANSIENTE DO VAZAMENTO .....	17
FIGURA 2. 7 – ESQUEMA DA LÓGICA ESTATÍSTICA DO PPA.....	20
FIGURA 2. 8 – ILUSTRAÇÃO GRÁFICA DA APLICAÇÃO DO FILTRO SOBRE UM PADRÃO DE PRESSÃO ASSOCIADO A VAZAMENTO.....	21
FIGURA 2. 9 – DIAGRAMA DE BLOCOS DE SISTEMA DE MONITORAMENTO UTILIZANDO TRANSDUTORES DE PRESSÃO DE ACORDO COM PPA .....	23
FIGURA 2. 10 – TELA DO LEAKWARN – RETIRADO DE SIMULATIONS (2000 ).....	30
FIGURA 2. 11 – SIGNATURE PLOT <sup>®</sup> .....	31
FIGURA 2. 12 – CURVAS DE SENSIBILIDADE PARA DIFERENTES LIMITES DE OPERAÇÃO....	33
 FIGURA 3. 1 – TELA DE OPÇÕES DO MÓDULO <i>CONFIGURATION</i> .....	36
FIGURA 3. 2 – TELA DE OPÇÕES DO MÓDULO <i>CASE</i> .....	37
FIGURA 3. 3 – TELA DE DEFINIÇÃO DE NODES E KNOTS .....	39
FIGURA 3. 4 – ESQUEMA DA ESTRUTURA DE RESOLUÇÃO DO LIQNET .....	39
FIGURA 3. 5 – TELA DE DEFINIÇÃO DE OPÇÕES DE RESOLUÇÃO.....	40
FIGURA 3. 6 – MALHA PARA O MÉTODO "MODIFIED BOX" .....	44
 FIGURA 4. 1 – ESQUEMA DO DUTO DE TESTE.....	55
 FIGURA 5. 1 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 10 KM .....	59
FIGURA 5. 2 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 15 KM .....	59
FIGURA 5. 3 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 20 KM .....	60
FIGURA 5. 4 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 30 KM .....	60
FIGURA 5. 5 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 40 KM .....	60
FIGURA 5. 6 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 42 KM .....	61
FIGURA 5. 7 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 45 KM .....	61
FIGURA 5. 8 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 10 KM .....	63
FIGURA 5. 9 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 15 KM .....	63
FIGURA 5. 10 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 20 KM .....	63
FIGURA 5. 11 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 30 KM .....	63
FIGURA 5. 12 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 40 KM .....	64
FIGURA 5. 13 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 42 KM .....	64
FIGURA 5. 14 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 45 KM .....	64
FIGURA 5. 15 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 10 KM .....	66
FIGURA 5. 16 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 15 KM .....	66
FIGURA 5. 17 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 20 KM .....	66

FIGURA 5. 18 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 30 KM.....	66
FIGURA 5. 19 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 40 KM.....	67
FIGURA 5. 20 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 42 KM.....	67
FIGURA 5. 21 – QUEDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTO NA POSIÇÃO 45 KM.....	68
FIGURA 5. 22 – TENDÊNCIA DA QUEDA DE PRESSÃO DURANTE VAZAMENTO – FLUIDO: ÓLEO DIESEL .....	69
FIGURA 5. 23 – COMPORTAMENTO DA VAZÃO EM RELAÇÃO AO GANHO ESTÁTICO PARA O ÓLEO DIESEL .....	70
FIGURA 5. 24 – TENDÊNCIA DA QUEDA DE PRESSÃO DURANTE VAZAMENTO – FLUIDO: GASOLINA .....	70
FIGURA 5. 25 – COMPORTAMENTO DA VAZÃO EM RELAÇÃO AO GANHO ESTÁTICO PARA A GASOLINA .....	72
FIGURA 5. 26 – TENDÊNCIA DA QUEDA DE PRESSÃO DURANTE VAZAMENTO – FLUIDO: GLP .....	72
FIGURA 5. 27 – COMPORTAMENTO DA VAZÃO EM RELAÇÃO AO GANHO ESTÁTICO PARA O GLP .....	74
FIGURA 5. 28 – PERDA DE PRESSÃO EM TRECHOS DE DUTO COM VAZAMENTO NA POSIÇÃO 10 KM, FLUIDO: ÓLEO DIESEL .....	75
FIGURA 5. 29 – PERDA DE PRESSÃO EM TRECHOS DE DUTO COM VAZAMENTO NA POSIÇÃO 10 KM, FLUIDO: GASOLINA .....	76
FIGURA 5. 30 – PERDA DE PRESSÃO EM TRECHOS DE DUTO COM VAZAMENTO NA POSIÇÃO 10 KM, FLUIDO: GLP .....	77
FIGURA 5. 31 – RELAÇÃO ENTRE O TIPO DE FLUIDO COM A CONSTANTE DE TEMPO 1 DURANTE VAZAMENTOS NA POSIÇÃO 10 KM.....	77
FIGURA 5. 32 – RELAÇÃO ENTRE O TIPO DE FLUIDO COM A CONSTANTE DE TEMPO 2 DURANTE VAZAMENTOS NA POSIÇÃO 10 KM.....	77
FIGURA 5. 33 – RELAÇÃO ENTRE A VISCOSIDADE DE FLUIDO COM A CONSTANTE DE TEMPO 1 DURANTE VAZAMENTOS NA POSIÇÃO 10 KM.....	77
FIGURA 5. 34 – RELAÇÃO ENTRE A VISCOSIDADE DE FLUIDO COM A CONSTANTE DE TEMPO 2 DURANTE VAZAMENTOS NA POSIÇÃO 10 KM.....	77
FIGURA 5. 35 – SUPERFÍCIE PARA ÓLEO DIESEL.....	79
FIGURA 5. 36 – SUPERFÍCIE PARA A GASOLINA .....	80
FIGURA 5. 37 – SUPERFÍCIE PARA GLP .....	81
FIGURA 5. 38 – RELAÇÃO ENTRE O TIPO DE FLUIDO COM A PERDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTOS NA POSIÇÃO 10 KM.....	82
FIGURA 5. 39 – RELAÇÃO ENTRE O TIPO DE FLUIDO COM A PERDA DE PRESSÃO DEVIDO A VAZAMENTOS NA POSIÇÃO 10 KM.....	82

## LISTA DE NOMENCLATURA

- $a$  - velocidade de onda do sistema duto-líquido  
 $A$  - área de secção transversal,  $\text{ft}^2$  ou  $\text{m}^2$   
 $A_{\text{ct}}$  - valor real da variável controlada  
 $A_0, B_0, C_0, D_0, E_0, a_0, b_0, c_0, d_0$  - coeficientes empíricos  
 $A_1$  - coeficiente empírico 1  
 $A_2$  - coeficiente empírico 2  
 $c$  - estado de stress na parede do duto  
 $c_w$  - capacitância térmica do material do tubo por comprimento linear  
 $C_{\text{der}}$  - constante de controle derivativo  
 $C_{\text{int}}$  - constante de controle integral  
 $C_1$  - constante dependente da tensão na parede da tubulação  
 $C_p$  - calor específico a pressão constante  
 $C_{\text{prop}}$  - constante de controle proporcional  
 $C_T$  - calor específico a temperatura constante,  $\text{Btu/lbm/R}$  ou  $\text{J/kg/K}$   
 $C_v$  - calor específico a volume constante,  $\text{Btu/lbm/R}$  ou  $\text{J/kg/K}$   
 $d$  - diâmetro interno do tubo,  $\text{ft}$  ou  $\text{m}$   
 $d_{\text{or}}$  - diâmetro do orifício,  $\text{ft}$  ou  $\text{m}$   
 $d_1$  - diâmetro do tubo a pressão atmosférica,  $\text{ft}$  ou  $\text{m}$   
 $D$  - operador de derivada total  
 $e$  - rugosidade relativa da tubulação, adimensional  
 $E$  - módulo de Young do material da parede  
 $\text{FB}$  - resultado do balanço volumérico  
 $g$  - aceleração da gravidade,  $\text{m/s}^2$   
 $h$  - entalpia específica  
 $h_h$  - elevação,  $\text{ft}$  ou  $\text{m}$   
 $H_0$  - probabilidade nula  
 $H_A$  - probabilidade alternativa  
 $i$  - quantidade de fluido contida no interior do duto

$i - n$  - representa o enésimo valor precedente  
 $i - 1$  - representa o valor mais recente  
 $k_v$  - coeficiente de vazão,  $m^3/s/psi^{-0,5}$  ou  $m^3/s/Pa^{-0,5}$   
 $K$  - módulo de Bulk do fluido  
 $K_0$  - constante  
 $K_e$  - ganho  
 $K_H$  - coeficiente de transferência térmica por comprimento linear  
 $K_1$  - constante  
 $L$  - comprimento do tubo, m  
 $L_0$  - comprimento inicial do tubo, m  
 $L_1$  - localização do vazamento  
 $L_{LD}$  - localização relativa do vazamento  
 $L_p$  - comprimento total do tubo  
 $m_1$  - vazão que entra na tubulação,  $m^3/s$  ou  $kg/s$   
 $m_2$  - vazão que sai da tubulação,  $m^3/s$  ou  $kg/s$   
 $n_1$  - tamanho de amostra 1  
 $n_2$  - tamanho de amostra 2  
 $p_e$  - pressão do ambiente submarino, psi ou Pa  
 $p_{in}$  - pressão na entrada da tubulação, psi ou Pa  
 $p_l$  - pressão no vazamento, psi ou Pa  
 $p_{out}$  - pressão na saída da tubulação, psi ou Pa  
 $P$  - pressão, psi ou Pa  
 $P_0$  - pressão de referência, psi ou Pa,  
 $P_1$  - pressão a montante, psi ou Pa  
 $P_2$  - pressão a jusante, psi ou Pa  
 $P_i$  - iésima valor de pressão  
 $PK$  - mudança na quantidade contida no duto  
 $PP$  - probabilidade  
 $Q$  - calor transferido para o fluido,  $kg.m/s^2$  ou cal  
 $Q_{in}$  - vazão de fluido entrando na tubulação,  $m^3/s$  ou  $kg/s$   
 $Q_l$  - vazão do vazamento

$Q_{LD}$  - vazão relativa do vazamento  
 $Q_{out}$  - vazão de fluido saindo da tubulação,  $m^3/s$  ou  $kg/s$   
 $Q(z)$  - função densidade de probabilidade  
 $R$  - coeficiente de resistência da tubulação  
 $Re$  - número de Reynolds, adimensional  
 $R_g$  - Constante dos gases  
 $R_l$  - coeficiente de resistência com vazamento  
 $Set$  - *setpoint* da variável controlada  
 $t$  - tempo, s  
 $T$  - temperatura, R ou K  
 $T_G$  - temperatura da vizinhança, K  
 $T_{gnd}$  - temperatura do solo, R ou K,  
 $T_0$  - temperatura de referência, R ou K  
 $T_1$  - temperatura a montante, R ou K  
 $T_2$  - temperatura a jusante, R ou K  
 $V$  - volume, unidade compatível  
 $VB$  - valor resultante do balanço  
 $W$  - trabalho realizado pelo fluido sobre a vizinhança,  $kg.m/s$   
 $x$  - distância ao longo da tubulação, ft ou m  
 $x$  - expoente empírico  
 $\bar{y}$  - população da média móvel  
 $Z$  - intervalo de confiança no desvio padrão  
  
 $\Delta E$  - variação da energia de um fluido,  $kg.m/s$   
 $\Delta_H$  - perda de carga  
 $\Delta M$  - diferença entre a massa contida no tempo  $t$  e a massa no tempo  $t_0$   
 $\Delta P$  - variação de pressão  
 $\Delta Rpm$  - passo de controle de velocidade  
 $\Delta t$  - passo de cálculo do modelo  
 $\Delta T$  - variação de temperatura



$\left(\frac{dM}{dt}\right)$  - acúmulo

$\alpha$  - coeficiente de expansão térmica do duto, 1/R ou 1/K

$\beta$  - constante

$\varepsilon$  - espessura da parede do tubo, ft ou m

$\xi$  - fator de fricção

$f$  - fator de atrito de Darcy

$\gamma$  - coeficiente empírico

$\rho$  - densidade, kg/m<sup>3</sup>

$\rho_w$  - densidade da água, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

$\rho_0$  - densidade de referência, kg/m<sup>3</sup>

$\theta$  - ângulo entre o tubo e a horizontal

$\sigma$  - desvio padrão da população

$\eta$  - coeficiente de transferência de calor, Btu/ft<sup>2</sup>/s/R ou J/m<sup>2</sup>/s/K

$\mu$  - viscosidade absoluta do fluido, slug/ft/s ou kg/m/s

$\bar{\mu}$  - média móvel

$\tau$  - eficiência da bomba, adimensional

$\tau_1$  - constante de tempo 1, s

$\tau_2$  - constante de tempo 2, s

$\gamma_1$  - densidade relativa do líquido no duto, adimensional

$v$  - velocidade do fluido, ft/s ou m/s

$\frac{\partial P}{\partial t}$  - taxa de mudança da pressão

$\delta P$  - desvio entre  $\bar{\mu}$  e  $P$

## 1 INTRODUÇÃO

A forma mais usual de transporte de petróleo e derivados por grandes distâncias é através de oleodutos. Essas extensas linhas atravessam as mais diversas localidades com diferentes geografias. É de fundamental importância se ter conhecimento sobre os possíveis vazamentos que podem ocorrer. O monitoramento destas linhas pode ser feito através de sistemas de detecção de vazamentos.

A preocupação com esse tipo de ocorrência fundamenta-se nos possíveis danos ao meio ambiente e conseqüentes custos com a sua recuperação, evitar desgastes à imagem da operadora e minimização de perdas de produção. Outro aspecto é a antecipação a uma legislação que porventura torne o sistema compulsório.

Existe uma gama de métodos para se detectar vazamentos, desde inspeções periódicas até *softwares*. As inspeções ocasionais podem ser realizadas a partir de observações externas ao duto. Os sistemas baseados em *software* fazem aquisição de dados em campo e analisam estes dados, industrialmente são conhecidos como sistemas SCADA. Os algoritmos matemáticos, que compõem o sistema, utilizam as variáveis medidas no duto em balanços de massa simples ou com correção do inventário, ou em análises transientes. Essas análises transientes são baseadas em equações para conservação da massa, energia e momento linear, equações de estado e equações empíricas.

O desempenho desses sistemas de detecção está diretamente relacionado com a precisão das medições (vazão, pressão, densidade e temperatura), a correta caracterização dos fluidos, os parâmetros do duto e o sistema de aquisição de dados utilizado.

Os métodos de balanço de material, freqüentemente utilizados, dependem das medições de vazão na entrada e saída do duto, as quais são intrinsecamente imprecisas, e acabam por gerar erros cumulativos no balanço.

Uma alternativa a esse problema seria o uso de sistemas baseados não em medidas de vazão, mas de pressão, cujos sensores são mais baratos e precisos. Um

sistema baseado somente na pressão, no entanto, defronta-se com o problema da mistura de eventos nas assinaturas de pressão. A tecnologia existente que utiliza essa abordagem chama-se *Pressure Point Analysis* e é pertencente à EFA Technology Inc (empresa Californiana que detém a patente).

O presente trabalho tem como objetivo apresentar assinaturas de pressão definidas em relação a vazão vazada, a posição do vazamento em relação a distância dos sensores de pressão, e também mostrar o comportamento nas diferentes elevações do duto.

O capítulo 2 apresenta a Revisão Bibliográfica, onde são expostos princípios físicos de escoamento em dutos. Na sequência, são descritos princípios de operação e as vantagens e desvantagens de alguns métodos de detecção de vazamentos, além de *softwares* comerciais.

O capítulo 3, Descrição do Simulador, apresenta em detalhe o simulador de escoamento de fluidos em dutos utilizado, bem como a sua forma de organização, a sua estrutura de cálculo e os modelos que utiliza.

O capítulo 4, Caracterização das Simulações, descreve detalhes do duto e fluidos abordados neste trabalho. Apresenta as propriedades pertinentes dos fluidos utilizados, além da caracterização estática do duto, condições de contorno e especificação de bomba.

O capítulo 5, Resultados e Discussão, apresenta os resultados obtidos nas simulações realizadas, mostra gráficos e comentários do comportamento da pressão em

relação ao tempo, em várias posições do duto, durante um evento de vazamento simulado, para os três fluidos considerados, óleo diesel, gasolina e GLP.

O capítulo 6, Conclusões, sintetiza os resultados obtidos e também expõe sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo foi organizado de forma a apresentar, inicialmente, princípios físicos importantes ao escoamento em dutos, tendo como foco as aplicações de vazamentos em tubulações que transportam hidrocarbonetos. Na sequência, são descritos princípios de operação e vantagens e desvantagens de alguns métodos de detecção de vazamentos, além de *softwares* comerciais.

### 2.1 PRINCÍPIOS FÍSICOS APLICADOS À DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

#### 2.1.1 Conservação da massa

O princípio da conservação da massa pode ser aplicado a um líquido fluindo no interior de uma tubulação, como mostra a figura 2.1, onde a vazão que entra na tubulação ( $m_1$ ) menos a vazão que sai ( $m_2$ ) é igual ao que se acumula no seu interior ( $dM/dt$ ).

$$m_2 - m_1 = \frac{dM}{dt} \quad (2.1)$$

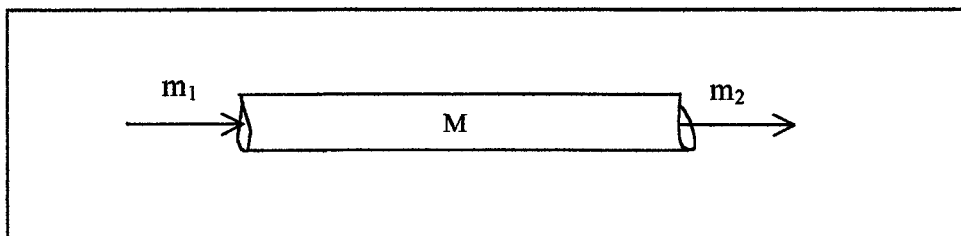


Figura 2. 1 Exemplo de aplicação da conservação da massa

Se não há acúmulo, isto é, quando o duto opera em regime permanente, a vazão que entra tem que ser igual a que sai, já que não há mudança na massa contida no interior do duto.

No caso de regime transiente, uma mudança na pressão pode ocasionar alteração na massa contida no duto, por incidir sobre duas propriedades do fluido, a compressibilidade e a densidade e, sobre a área de secção transversal do tubo. Devido a isso é preciso conhecer a vazão de entrada e saída do duto e as características de deformação do tubo e do fluido para exprimir o princípio da conservação da massa, de acordo com LIOU (1993).

### 2.1.2 Conservação da energia

A primeira lei da termodinâmica exprime a variação da energia de um fluido como sendo igual à diferença entre o calor transferido para o fluido e o trabalho realizado pelo fluido sobre a vizinhança.

$$\Delta E = Q - W \quad (2.2)$$

Nem sempre é necessário considerar a conservação da energia em modelos para a detecção de vazamentos, principalmente quando os escoamentos se aproximam da condição isotérmica, o que no Brasil é perfeitamente possível para derivados de petróleo.

No caso de gases, óleos combustíveis aquecidos, ou mesmo derivados que experimentam grande variação geográfica de temperatura ao longo do duto é determinístico considerar os efeitos térmicos para o sucesso da modelagem de operações de transferência, dado que quantidades relevantes de energia cinética que efetivamente produzem movimento, velocidade, e, por conseguinte se convertem em vazão, são retiradas do fluido devido a um resfriamento abrupto, o que causa desbalanceamentos mássicos em tempo real.

### 2.1.3 Lei do movimento – Segunda lei de Newton

A força que age sobre um corpo é fornecida pela velocidade de variação da quantidade de movimento do fluido que passa através do corpo, em qualquer instante, de acordo com BENNETT (1978), em outras palavras, o *somatório de forças* = *massa* x

*aceleração*. Assim, a pressão e a velocidade interagem para manter um equilíbrio dinâmico descrito pela lei do movimento de Newton. No caso do regime permanente, o princípio não tem utilidade para detecção de vazamentos em dutos por não haver aceleração, segundo LIOU (1993).

A conservação do momento linear é a única equação efetivamente integrada no balanço diferencial para soluções de abordagem RTTM (*Real Time Transient Model*), ou seja, não pode ter sua solução desacoplada da equação de conservação da massa. É o balanço mais importante, por ser o único que consegue medir a conversão de pressão em velocidade de escoamento e também por ser o único capaz de contabilizar efeitos viscosos no escoamento.

#### 2.1.4 Regime de escoamento e a perda de carga

Em virtude do atrito do fluido com a parede da tubulação, uma parte da pressão é utilizada para vencer a resistência ao atrito, transformando-se em calor, dessa forma, a pressão total decresce a medida que se aproxima da descarga da tubulação. Essa perda de energia mecânica é chamada de *head loss* ou perda de carga.

Um fluido que escoar em um duto com baixa velocidade move-se em camadas paralelas ou laminares. Camadas que deslizam umas sobre as outras, sem haver mistura macroscópica entre elas, e com velocidade constante em qualquer ponto ao longo de uma linha de corrente, caracterizam o escoamento **laminar**.

Quando as partículas se movem em todas as direções através do fluxo, devido a turbilhões, a velocidade estará variando no tempo em qualquer ponto. Esse tipo de escoamento, denominado **turbulento** pode ser observado em fluidos movimentando-se em velocidades altas. Na maior parte das situações reais de escoamento em dutos, o regime é turbulento.

A experiência mostra que para escoamento turbulento, STREETER (1977), a perda de carga:

- varia diretamente com o comprimento do tubo,

- varia quase que proporcionalmente ao quadrado da velocidade,
- varia quase que inversamente com o diâmetro e depende da rugosidade da superfície interior do tubo,
- depende das propriedades do fluido, massa específica e viscosidade,
- é independente da pressão.

Isso é expresso pela equação de Darcy-Weisbach a seguir:

$$\Delta_H = f \frac{L}{d} \times \frac{v^2}{2g} \quad (2.3)$$

e  $f = f(\text{Re}, e)$

onde:

$\Delta_H$  – perda de carga,  $f$  - fator de atrito,  $L$  - comprimento do tubo,  $d$  – diâmetro interno,  $g$  – aceleração da gravidade,  $v$  - velocidade,  $\text{Re}$  – número de Reynolds,  $e$  – rugosidade do tubo.

## 2.2 ESTADO DA ARTE DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

Diferentes métodos para detectar a presença de vazamentos em oleodutos têm sido empregados. Estes podem ser distinguidos em métodos de base externa e métodos de base interna, segundo a definição do API 1130 (1995). Os primeiros se baseiam na detecção física do vazamento de um fluido vazando sem utilizar processamento computacional de medições de campo. Esses são também chamados sistemas de detecção de vazamentos baseados em sensoriamento via *hardware* dedicado. Alguns métodos de métodos de base externa são,

- emissões acústicas (baseados em sinais acústicos),
- cabo de fibra ótica (baseados em pressão ou sinais elétricos),
- cabo dielétrico (baseado em sinais elétricos ou campo magnético),
- tubo sensível a vapores (baseados em difusão de massa),
- sensores de gás (baseado também em difusão de massa).

Os métodos de base interna utilizam técnicas computacionais e sensores para monitorar variáveis internas das tubulações, como; pressão, temperatura, viscosidade, densidade, vazão, velocidade sônica do produto, posição da interface, etc. Esses métodos são apresentados com mais detalhes a seguir.

Em geral, os métodos de detecção de vazamentos baseados em *software* utilizam a comparação entre os parâmetros medidos no duto e os valores estimados. Sua nomenclatura varia entre duas linhas, a saber: as normas API 1130 e o 1155 os chamam de CPM - *Computational Pipeline Monitoring*, já autores como [Liou], [Van Reet], [Nicholas], e [Baptista] denominam *Models* ou modelos. Os valores estimados das variáveis de processo são calculados por um módulo denominado Estimador de Estados, utilizando as formulações egressas do fenômeno físico que caracteriza o problema.

Pode-se utilizar duas abordagens para estimar estados, são elas: abordagem em regime permanente, comumente relatada na literatura como *Real Time Model* (RTM), e em regime transiente, geralmente denominado como *Real Time Transient Model* (RTTM).

### 2.2.1 BALANÇO VOLUMÉTRICO (RTM)

Um dos primeiros métodos desenvolvidos para detectar a presença de vazamentos em uma tubulação foi o Método de Balanço do Volume.

O princípio físico do balanço de volume é a conservação da massa. Em regime permanente, a quantidade de fluido que entra no duto, em qualquer intervalo de tempo, deve ser igual a quantidade que sai, no mesmo intervalo de tempo, desde que se tenha regime permanente. Matematicamente, segundo WHALEY *et alli* (1992) a relação pode ser expressa como:

$$VB = \sum_{in} \int_{t_0}^t Q_{in} dt - \sum_{out} \int_{t_0}^t Q_{out} dt \quad (2.4)$$

onde:

$Q_{in}$  é a vazão de fluido entrando na tubulação



$Q_{out}$  é a vazão de fluido saindo da tubulação

VB é o valor resultante do balanço

No método do balanço do volume, o valor resultante VB, deveria ser zero em uma tubulação que não está vazando (considerando regime permanente). O balanço do volume será positivo se um vazamento ocorre, devido ao fluido que está escapando do tubo.

Este método é mais freqüentemente usado para tubulações de óleo cru ou líquidos que não são bombeados em batelada, de acordo com WHALEY *et alli* (1992), uma vez que são simples i. e., não fazem qualquer tipo de correção. Por esta razão, para GLP, que é um líquido com alta compressibilidade, esse método tende a ser altamente ineficiente/ineficaz.

Essa abordagem considera implicitamente que o sistema está em estado estacionário, isto é, toda massa injetada na tubulação sobre um dado intervalo de tempo, é igual a massa que sai.

O limite de detectabilidade do menor vazamento que pode ser identificado utilizando esta abordagem é a incerteza na quantidade contida no duto, pelo fato desse método não fazer a correção na massa de fluido contida no duto.

Com a inserção de mais um termo na equação (2.4), fica:

$$VB = \sum_{in} \int_{t_0}^t Q_{in} dt - \sum_{out} \int_{t_0}^t Q_{out} dt - \Delta M \quad (2.5)$$

Isto melhora muito a capacidade de detecção do método, porque se utilizam correções na densidade de referência do fluido e na deformação radial e longitudinal com relação a pressão e temperatura. A densidade é então multiplicada pelo volume. O terceiro termo ( $\Delta M$ ) na equação 2.6 é a simples diferença entre a massa contida no tempo  $t$  e a massa no tempo  $t_0$ .

A quantidade de fluido contida no interior do duto ( $i$ ) é função do diâmetro ( $d$ ), da espessura da parede ( $\varepsilon$ ), do módulo de Young do material da parede ( $E$ ), do coeficiente de expansão térmica do duto ( $\alpha$ ), da densidade do produto ( $\rho_0$ ), da pressão

(P) e da temperatura (T). Geralmente, considera-se temperatura e pressão constantes no segmento de tubulação em questão e calcula-se uma densidade média. Visando reduzir a imprecisão na massa contida no duto, inclui-se o efeito da mudança de temperatura na densidade, no cálculo do conteúdo do duto ( $i$ ), LIOU (1993):

$$i = \int_0^L \rho(x) A(x) dx \quad (2.6)$$

onde:

$$L = L_0(1+\Delta T), \text{ e} \quad (2.7)$$

$$A(x) = A_0 \left( e^{\frac{dC_1 P(x)}{E\varepsilon}} + 2\alpha\Delta T \right) \quad (2.8)$$

e  $C_1$  é uma constante que depende da tensão na parede da tubulação, por simplificação, pode ser assumido com valor unitário. Com a pressão e temperatura uniformes a equação da quantidade contida no interior do duto ( $i$ ), pode ser escrita como:

$$i = C_T C_P \rho_0 \left\{ A_0 \left[ e^{\frac{dP}{E\varepsilon} + 2\alpha\Delta T} \right] \left[ L_0 (1+\alpha\Delta T) \right] \right\}, \quad (2.9)$$

sendo que,

$$\rho = C_P C_T \rho_0, \text{ e} \quad (2.10)$$

$$C_T = e^{-\alpha_T \Delta T (1+0,8\alpha_T \Delta T)} \quad (2.11)$$

onde,

$$\alpha_T = \frac{K_0 + K_1 \rho_0^\beta}{\rho_0^2} \quad (2.12)$$

sendo  $K_0$ ,  $K_1$  e  $\beta$ , constantes cujos valores são fornecidos em LIOU (1993). Já

$$C_P = \frac{1}{1-FP}, \quad (2.13)$$

onde:

$$F = \frac{1}{10^6} (1 - 7,3 \times 10^{-6} P) e^{\left( A+BT + \frac{C}{\rho_0^2} + \frac{DT}{\rho_0^2} \right)} \quad (2.14)$$

Com estas correções, o erro no balanço de volume é reduzido ao erro nos medidores de vazão mais a variação do inventário.

Para aumentar a sensibilidade do método a vazamentos menores, utiliza-se um intervalo de tempo de  $t_0$  a  $t$  maior, em razão da variação do inventário ser diluída sobre o tempo. O erro na variação do inventário, por sua vez, não é reduzido pelo aumento do intervalo de tempo, já que esse cálculo é a diferença de dois valores no começo e no final do período de tempo.

No caso da variação do inventário, os problemas são o ruído, erros nas medidas de pressão e temperatura (praticamente desprezíveis, quando comparados com o de vazão), incertezas na interface entre bateladas sequenciais, para linhas de líquidos, e incertezas na composição e propriedades do fluido.

### **Vantagens e desvantagens**

Uma desvantagem é que em muitos casos, os tempos de resposta são excessivamente longos, devido à necessidade de manter um nível aceitável de alarmes falsos, que é o principal desafio de se sintonizar um SDV: manter uma coerência minimamente estabelecida entre falsos alarmes (confiabilidade) e rapidez de detecção (sensibilidade). Esses alarmes ocorrem em virtude do método ser aplicado a sistemas geralmente transientes e, no entanto se basear na consideração do escoamento se dar em regime permanente.

Outra desvantagem é o problema de a localização do vazamento não poder ser feita utilizando o método do balanço do volume. Uma forma de melhorar o desempenho deste método seria incluir medidores de vazão em segmentos da tubulação, melhorando a sensibilidade da detecção de vazamentos e permitindo que o vazamento seja localizado dentro de segmentos.

O método do balanço de volume pode atingir a sensibilidade aproximada da precisão dos medidores de vazão.

### 2.2.2 Métodos baseados em modelo transiente (RTTM)

As linhas de escoamento de fluidos, abordadas neste trabalho, são sujeitas a operações que originam transientes independentes que podem ocorrer ao mesmo tempo, como os transientes:

- 1 - da bomba (para sair da vazão zero e estabilizá-la na vazão operacional);
- 2 - da abertura da válvula à jusante da bomba;
- 3 - a própria transiência natural da linha;
- 4 - o transiente de acomodação dos fluidos compressíveis dentro do duto, também chamado de transiente sônico (o maior e o mais importante deles).

Essas operações causam mudanças no inventário do duto, que deve ser calculada para fins de detecção de vazamentos.

Com o intuito de separar os efeitos de um vazamento de outros fenômenos, este método usa modelo transiente para simular em tempo real o transiente em uma tubulação. É mais complexo que o modelo em regime permanente, pois usa, além da equação da massa, a do movimento e da energia. É necessário conhecer toda a configuração física estática do duto, como comprimento, diâmetro, rugosidade interna e espessura da parede, tipos de válvulas e localização, propriedades térmicas do solo, precisão dos sensores, etc. Adicionalmente, são necessários dados dinâmicos como a densidade do fluido escoando, vazão, pressão, temperatura, etc, segundo API 1130 (1995).

As equações que regem este método são apresentadas abaixo e foram obtidas de LIOU C. P. (1983) e estão explicitadas em termos das variáveis que realmente podem ser medidas em tempo real, durante a operação, quais sejam, pressão e vazão (essa sob a forma de velocidade de escoamento).

$$\frac{DP}{Dt} + \rho \alpha^2 \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (2.15)$$

$$\rho \frac{Dv}{Dt} + \frac{\partial P}{\partial x} + \rho f \frac{v|v|}{2d} + \rho g \sin(\theta) = 0 \quad (2.16)$$

A equação da energia está expressa em termos de derivadas de pressão e temperatura do fluido.

$$\left(\frac{\partial h}{\partial P} - \frac{1}{\rho}\right) \frac{DP}{Dt} + \left(\frac{c_w}{\rho A} + c_p\right) \frac{DT}{Dt} = 4K_H \frac{(T_G - T)}{\rho d} + f \frac{|v|^3}{2d} \quad (2.17)$$

onde  $P$  = pressão,  $v$  = velocidade,  $d$  = diâmetro da tubulação,  $A$  = área de secção transversal do tubo,  $g$  = aceleração da gravidade,  $f$  = fator de fricção de Darcy-Weisbach,  $x$  = distância ao longo do duto,  $t$  = tempo,  $\theta$  = ângulo entre o tubo e a horizontal,  $c_w$  = capacitância térmica do material do tubo por comprimento linear,  $c_p$  = calor específico a pressão constante,  $K_H$  = coeficiente de transferência térmica por comprimento linear,  $T_G$  = temperatura da vizinhança,  $K$  = módulo de Bulk do fluido e  $a$  = velocidade de onda do sistema duto-líquido dado por:

$$a = \sqrt{\frac{K/\rho}{1 + Kdc/(E\varepsilon)}} \quad (2.18)$$

onde  $E$  = módulo de Young do material do tubo,  $\varepsilon$  = espessura da parede do tubo e  $c$  = é uma constante que reflete o estado de stress na parede do duto.

Para resolver o modelo da tubulação com precisão, o *software* deve ter sintonia ou modelagem adaptativa, pois, ainda que haja características conhecidas do tubo, como comprimentos, diâmetros nominais e espessura nominal de parede; há outras, como rugosidade interna, diâmetro interno real, espessura real da parede interna do duto e a calibração dos instrumentos que não são completamente conhecidas.

A modelagem adaptativa utiliza a diferença entre os valores simulados e os valores medidos no duto (os quais não foram utilizados nos cálculos) no ajuste de alguns parâmetros do modelo.

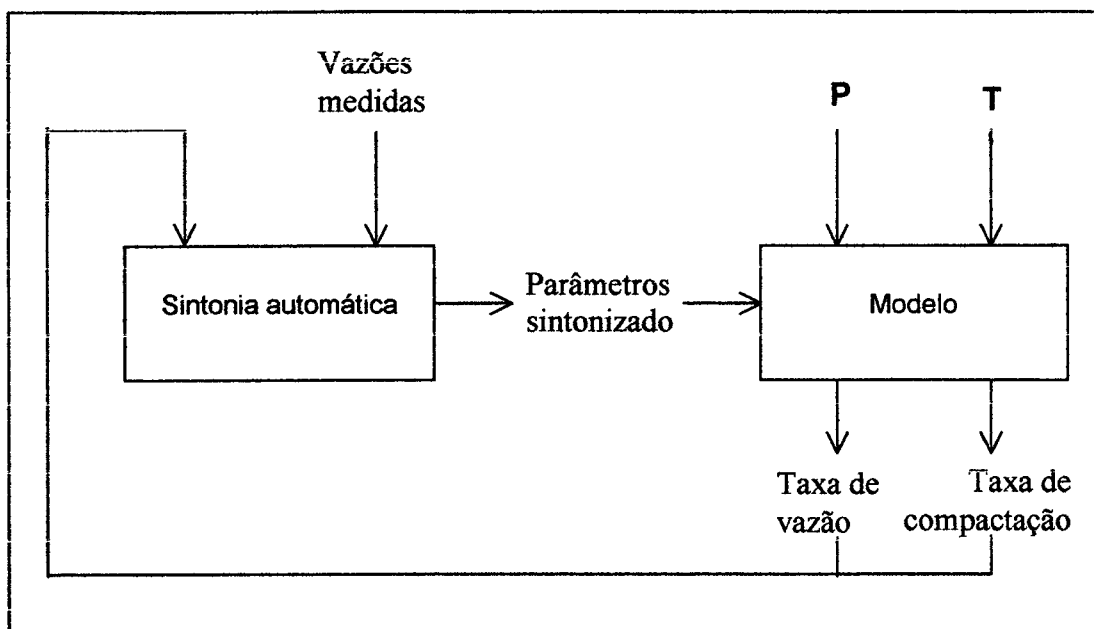
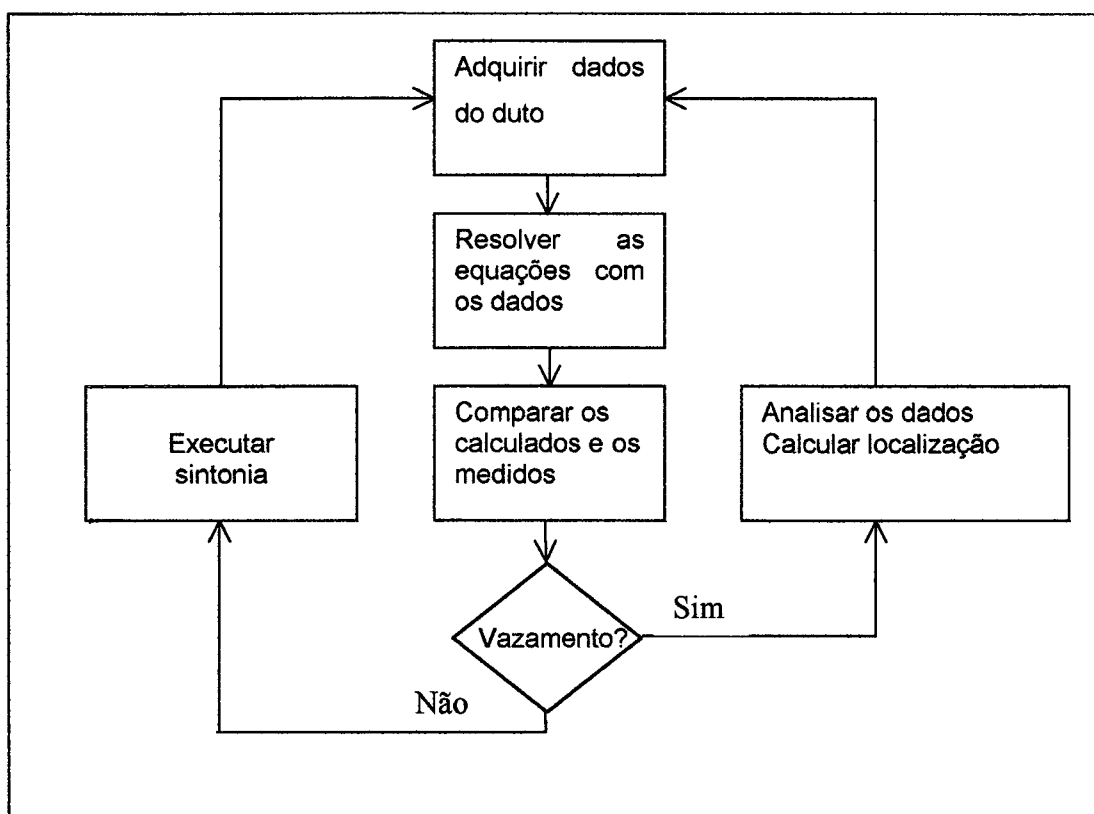


Figura 2. 2 Modelagem Adaptativa

A metodologia, mostrada a seguir, foi retirada de WHALEY *et alli* (1992). É utilizado, geralmente, para simular o escoamento e a termodinâmica em tempo real e também, detectar vazamentos. Ela pode ser resumida por:

- 1) aquisição de dados do duto,
- 2) uso de alguns valores medidos como condição de contorno para integração das equações da energia, momento linear e continuidade,
- 3) comparação dos valores calculados contra os medidos não usados como condição de contorno e,
- 4) se nenhum vazamento é presente, usa as discrepâncias entre os valores medidos e calculados para ajustar os parâmetros. É chamado processo estocástico dinâmico.



**Figura 2. 3 - Diagrama de modelo de detecção de vazamento baseado na vazão**

Existem duas técnicas de detecção que utilizam este modelo, a Análise de Desvio e o método de compensação do balanço de volume.

### **Análise de Desvio**

Esta técnica utiliza medições em intervalos regulares e freqüentes, determinados pela *SCAN Rate* do sistema de comunicação que suporta o SCADA, na tubulação como condição de contorno para rastrear transientes durante o escoamento de fluido. Considerando que o modelo considera as medidas nos extremos da tubulação, os desvios entre os valores calculados e essas medidas deveriam ser indicativos de um vazamento estando a tubulação em transiente ou não.

A pressão a montante é constante, porque está sendo usada como condição de contorno para o modelo, da mesma forma que a vazão a jusante. O vazamento produz um aumento na vazão a montante, o que ocasiona uma grande diferença de pressão no

segmento a montante. A jusante do vazamento, a vazão é a mesma que a usada pelo modelo, causando uma queda de pressão que é a mesma prevista pelo modelo.

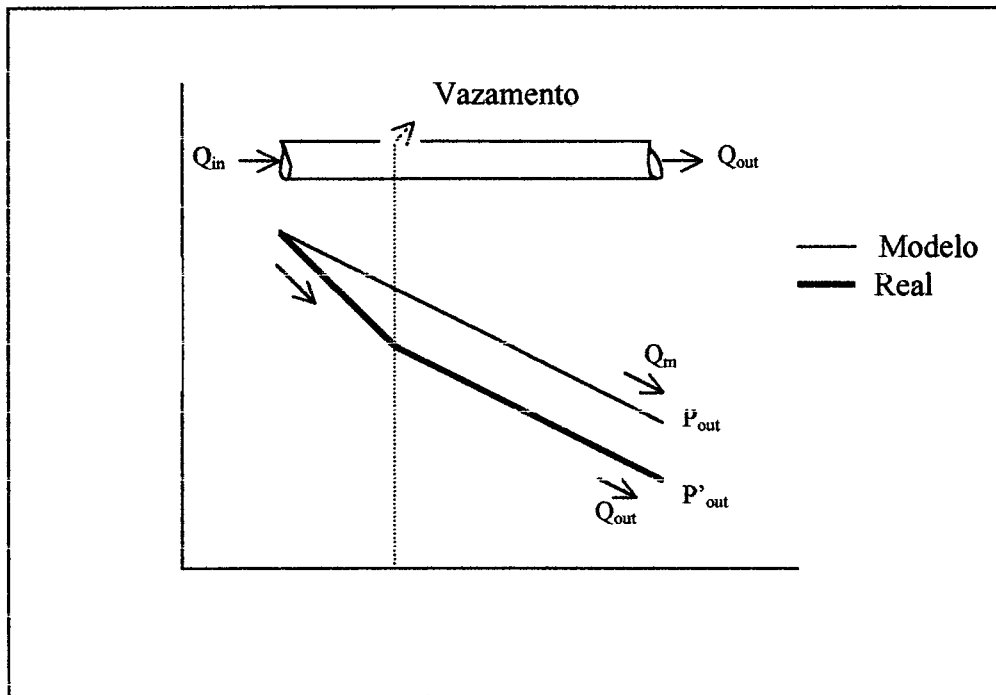


Figura 2. 4 - Análise do desvio

O resultado do vazamento é o desvio entre a pressão calculada a jusante e a medida, ou o desvio entre a vazão a montante calculada e a medida. O desvio da pressão é uma função da quantidade vazada e a sua localização no duto. O desvio da vazão é função da vazão do vazamento.

Podem ocorrer pequenos desvios entre os valores medidos e os valores calculados, que podem ser ocasionados por ruído nas medições, incertezas nas propriedades dos fluidos ou erros de medida ou flutuações de frequência muito alta para ser modelada. Se esses desvios ultrapassarem o limite aceitável, tem-se uma condição de vazamento.

Uma das formas de se determinar a localização de um vazamento é o cálculo geométrico. Com o desvio da vazão, é possível deduzir o tamanho do vazamento e com o desvio da pressão, a localização. Esse método fornece também, registro de batelada e mistura de fluido.



### Balanço volumétrico compensado

Esta técnica baseia-se na comparação entre o cálculo do balanço de vazão obtido com os valores medidos e o modelo. Definindo o balanço de vazão como segue,

$$FB = \sum_{in} Q_{in} - \sum_{out} Q_{out} \quad (2.19)$$

onde  $Q_{in}$  e  $Q_{out}$  são as medições de vazão de entrada e saída no duto. A mudança na quantidade contida no duto (PK) é função da pressão e temperatura medidas na extremidade final do duto. Dessa forma o balanço de volume fica,

$$VB = FB - PK \quad (2.20)$$

Se o balanço de volume for igual a zero, o escoamento é normal, sem vazamento (o que somente ocorre em regime transiente). Quando um vazamento ocorre, a compactação vai rapidamente se modificar levando o balanço de volume a um valor positivo.

A seguir, são apresentados dois esquemas apresentados por WHALEY *et alli* (1992) para descrever o comportamento real da pressão e vazão quando ocorre um vazamento e a forma que o modelo prediz essas variáveis.

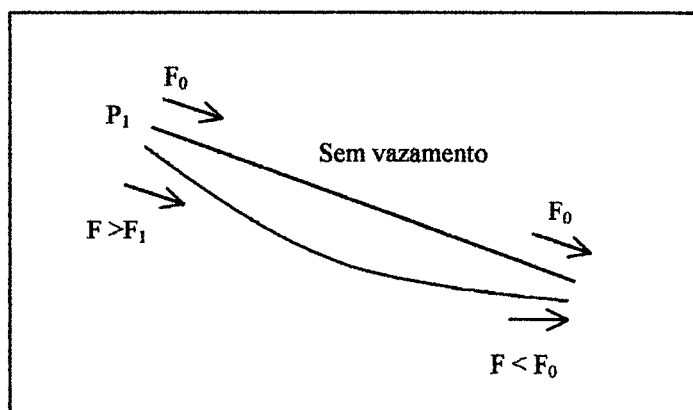
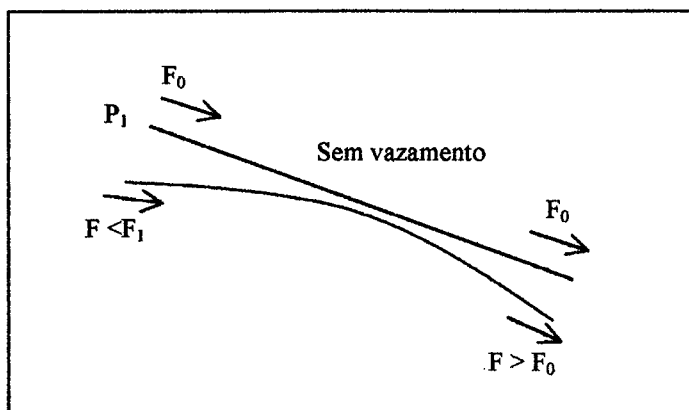


Figura 2. 5 - Comportamento da pressão e vazão sob o transiente do vazamento

Quando um vazamento ocorre em algum lugar da tubulação, devido a perda de fluido a pressão nas vizinhanças do vazamento cai. A onda de pressão resultante se propaga do local do vazamento para ambas extremidades da tubulação, resultando em

um aumento de vazão a montante e um decréscimo a jusante, como mostra a figura 2.5. Como um novo perfil de pressão é estabelecido, o resultado da vazão que entra menos a que sai se torna cada vez mais positivo até que uma condição estacionária é estabelecida, onde o balanço de volume passa a ser a quantidade vazada.

No caso do modelo, figura 2.6, a onda de pressão é propagada a partir da extremidade final do duto, onde o modelo é capaz de registrar a queda de pressão. Desta forma, o modelo prediz um aumento na vazão a jusante e um decréscimo a montante. Esta condição é consistente com uma tubulação que está descompactando.



**Figura 2. 6 - Comportamento da pressão e vazão sob o transiente do vazamento**

Havendo vazamento, o valor de compactação do modelo irá divergir do balanço de vazão, pequenas flutuações nas medidas causarão desvios entre a compactação e o balanço de vazão. Transientes normais resultam em balanços de vazão positivos ou negativos que levam o modelo a predizer a mesma taxa de compactação.

O método também emprega um limite sobre o qual nenhum vazamento é declarado. Quando o balanço excede o limite, o vazamento é anunciado.

### **Vantagens e desvantagens**

Esta abordagem apresenta capacidade de rápida detecção de vazamentos mesmo na presença de transientes.

A técnica é válida para uma larga faixa de condições operacionais incluindo vazões muito pequenas, pois a precisão do modelo não é sensível ao seu grau de sintonia. Incertezas na rugosidade da tubulação ou nas propriedades do fluido em escoamento têm pouco efeito sobre a taxa de compactação, desde que seus efeitos sejam uniformes em toda a tubulação. Se a taxa de compactação está correta, então a detecção do vazamento permanece válida mesmo quando o modelo não está sintonizado, segundo WHALEY *et alli* (1992), no entanto é bastante sensível à sintonia das propriedades físicas dos fluidos, como, por exemplo, módulo de Bulk.

Este método pode ser muito caro devido a necessidade de medidores de vazão em todas as entradas e saídas de tubulação, além de medidores de pressão e temperatura em todas as saídas de tubulação, sucção e descarga de bomba ou compressor. A precisão do método está diretamente relacionada a precisão dos medidores de vazão.

Quando as propriedades mudam significativamente, a composição do fluido também é necessária. Pode ser preciso conhecer a temperatura do solo dependendo do fluido em escoamento.

Por ser um método mais complexo, requer grande capacidade computacional.

### **2.2.3 Sistema de detecção de vazamentos utilizando medidas de pressão**

As técnicas descritas anteriormente, para detecção de vazamentos, levam em consideração os conceitos físicos envolvidos. Possuem um módulo chamado Estimador de estados que, com as variáveis pressão e vazão numa das extremidades do duto, calcula seu valor na outra extremidade. Através da comparação entre as variáveis estimadas e medidas, o Algoritmo de detecção estabelece um Sistema de Alarmes, a partir da diferença encontrada entre as variáveis e outras informações, BAPTISTA (1998).

Outra abordagem para o problema de identificação de vazamentos é através de modelos híbridos, onde há mistura dos conceitos de estimadores de estado e algoritmo

de detecção de vazamentos. Essa técnica utiliza procedimentos estatísticos, para a inferência acerca de vazamentos.

O sistema de monitoramento de tubulações, que é relatado a seguir, foi formulado por FARMER (1989). É um método e sistema de determinação da probabilidade de vazamento em tubulações, definido por análise estatística da pressão e é chamado de *Pressure Point Analysis*.

A probabilidade de um vazamento é calculada usando a média móvel da informação estatística obtida de diversas estações que monitoram pressão ou fluxo.

Esse sistema é usado onde há escoamento, seja de gases ou líquidos utilizando os instrumentos de monitoramento normalmente disponíveis em tubulações.

### Lógica de operação

O princípio de funcionamento é a queda de pressão na tubulação onde ocorre um vazamento. Essa queda é determinada através do cálculo de uma média móvel, onde é acumulado um conjunto dos mais recentes valores de pressão para análise. O conjunto é dividido em duas partes e a média é calculada da seguinte forma:

Uma média móvel do último valor  $n_1$  é computada cada vez que um novo valor está disponível, ou seja, uma nova porção de dados é recebida. Se a população da média móvel é representada por  $\bar{\mu}$ , então:

$$\bar{\mu}_i = \frac{1}{n_1} \sum_{k=i-n_1}^{n_1} P_i \quad (2. 21)$$

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n_2} \sum_{k=i-n_2}^{n_2} P_i \quad (2. 22)$$

sendo que  $n_2 < n_1$ .

$P_i$  é o  $i$ ésimo valor de pressão

$i - 1$  representa o valor mais recente

$i - n$  representa o enésimo valor precedente

O desvio padrão é calculado utilizando conceitos padrões de estatística que podem ser encontrados em SPIEGEL (1974).

Se  $z$  é o intervalo de confiança, medido no desvio padrão de  $\bar{\mu}$ , que  $\bar{\mu}$  e  $y$  são diferentes, então:

$$z = \frac{\bar{\mu} - \bar{y}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n_2}} \sqrt{\frac{n_1 - n_2}{n_1 - 1}}} \quad (2.23)$$

Quando a média  $\bar{\mu}$  é significativamente maior que a  $y$ , suspeita-se de vazamento.

Como exemplo do funcionamento do método *pressure point analysis*, tem-se, a amostra  $n_1$  é uma média móvel continuamente atualizada dos dados  $n_1$ . A amostra  $n_2$  é uma média móvel continuamente atualizada dos últimos pontos  $n_2$  de  $n_1$ , portanto uma série de 20 dados, por exemplo, com a exclusão de 5 e uma inclusão de 5 pontos poderia ser usada por  $n_1$  para computar  $\mu$ , enquanto somente os últimos 5 dos 20 pontos, por exemplo com um rebaixamento de 2 e adicionando 2 poderia ser usado para calcular  $y$  para média móvel  $n_2$ , como pode ser visto na figura 2.7

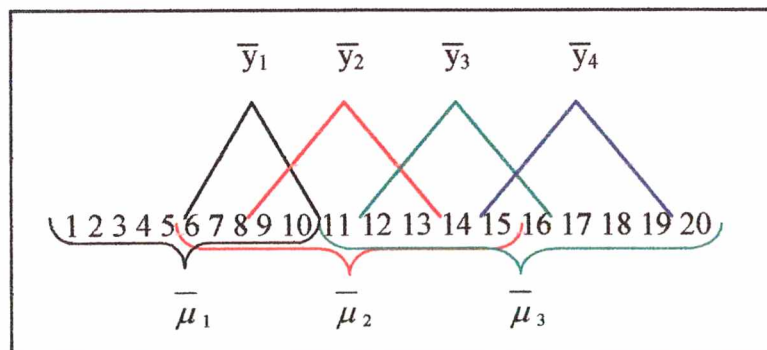


Figura 2. 7 - Esquema da lógica estatística do PPA

Os valores  $n_1$  e  $n_2$  podem ser, ajustados pelo usuário para permitir a adequação do método às aplicações específicas.

O tamanho da população,  $n_1$ , deve ser pequeno o suficiente para que o valor de  $\mu$  varie da mesma forma e siga as alterações na pressão, que podem ser originadas de ocorrências normais na tubulação, como alterações na temperatura, rugosidade, viscosidade, e outros parâmetros que podem mudar lentamente, segundo FARMER (1989).

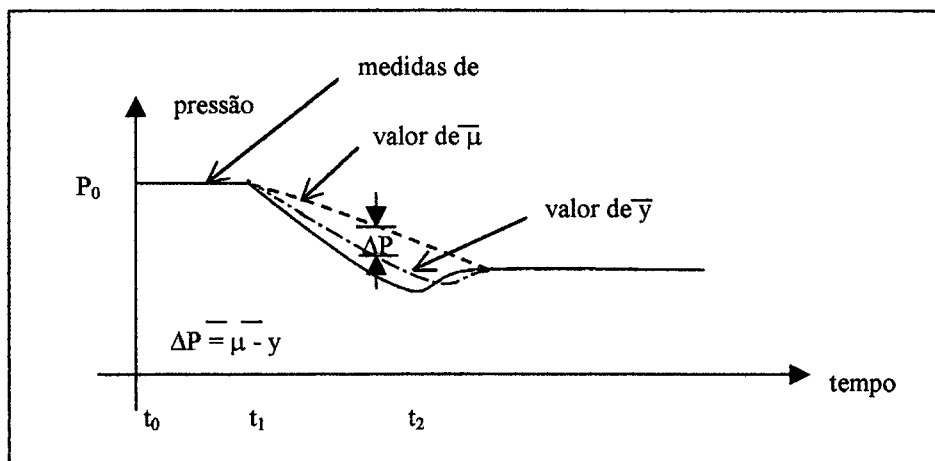
Para um intervalo de amostra em particular,  $\Delta t$ ,

$$n_1 = \frac{2\delta P_1}{\frac{\partial P}{\partial t} \Delta t} + 1, \quad (2.24)$$

onde  $\delta P$  representa o maior desvio entre  $\bar{\mu}$  e  $P$  que pode ser tolerado sem perda de precisão. A precisão é relacionada a precisão da medida de pressão e  $\frac{\partial P}{\partial t}$  é a taxa que a pressão pode mudar por ocorrências normais.

O tamanho da amostra  $n_2$  é selecionado para otimizar a velocidade na detecção. A otimização depende do padrão de pressão particular associado com o vazamento. O tamanho de amostra usado depende das características mecânicas da tubulação e do fluido, bem como do tamanho do vazamento. O ideal seria usar diversos valores de  $n_2$  independentemente e simultaneamente.

Sendo  $n_1$  e  $n_2$  controlados pelo usuário, variam com o diâmetro da tubulação, o nível de ruído antecipado na tubulação e a *SCAN rate* (podem variar de 5 a 60s).



**Figura 2. 8 - Ilustração gráfica da aplicação do filtro sobre um padrão de pressão associado a vazamento**

Em qualquer instante no tempo durante um vazamento:

$$\Delta P = \bar{\mu} - \bar{y} \quad (2.25)$$

Para determinar o  $\Delta P$ , a mudança na pressão, utiliza-se a expressão:

$$\Delta P = z = \frac{\bar{\mu} - \bar{y}}{\frac{\sigma}{\sqrt{n_2}} \sqrt{\frac{n_1 - n_2}{n_1 - 1}}} \quad (2.26)$$

Esta equação indica o  $\Delta P$  resultante de um vazamento no limiar da detecção com confiança  $z$ .

Já que a análise de dados é realizada pelo *software*, dessa forma, dá uma resposta estatística, determinar-se-á não um vazamento, mas a probabilidade de um vazamento.

Esse método pode ser utilizado também quando a característica a ser monitorada é uma vazão de fluido (velocidade). Os procedimentos envolvidos são os mesmos, no entanto, substitui-se a pressão pela velocidade do fluido nas expressões.

A probabilidade de quebra, ruptura ou vazamento é,

$$PP = 2 \int_{\sigma}^z Q(z) dz \quad (2.27)$$

Sendo: PP – probabilidade

$Q(z)$  – função densidade de probabilidade

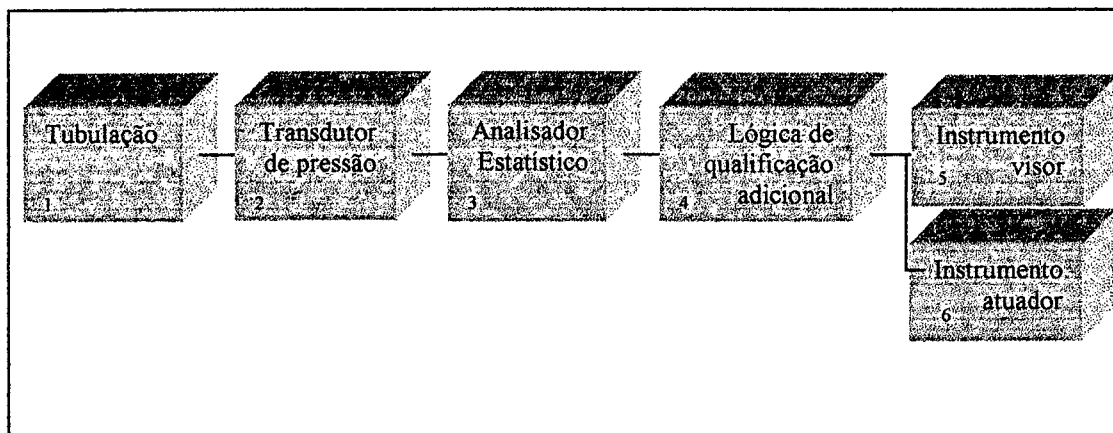
$Z$  – intervalo de confiança no desvio padrão

$\sigma$  - desvio padrão da população

sendo que o multiplicador 2 na equação (2.28), diz respeito a simetria em torno da distribuição de probabilidade.

A fim de analisar propriamente os dados do analisador estatístico, aplica-se um filtro estatístico. O analisador e a LQA, mostrados na figura 2.9 como 03 e 04, fazem uma determinação da probabilidade de vazamento usando o método da média móvel, enquanto o filtro estatístico revisa todos os pontos que vão para o analisador e fornece um refinamento da probabilidade do vazamento.

O filtro estatístico pode aplicar diferentes testes aos dados provenientes do analisador estatístico e LQA, para ajudar a formar a confiança da probabilidade de um vazamento, quebra ou ruptura.



**Figura 2. 9 - Diagrama de blocos de sistema de monitoramento utilizando transdutores de pressão de acordo com PPA**

A sensibilidade do método é maximizada pelo uso de grandes amostras tanto para  $n_1$ , quanto para  $n_2$ , entretanto, isto leva a um tempo longo para a detecção do vazamento. Com períodos de tempo menores, o sinal de vazamento atinge os valores da média mais rapidamente.

### Vantagens e desvantagens

A vantagem do *Pressure Point Analysis* é a simplicidade. Isto leva a um mínimo de instrumentação e potência computacional.

A desvantagem desse sistema é a necessidade de inibir o sistema durante transientes conhecidos, até que o oleoduto retorne a operação permanente. Qualquer operação que possa causar queda em uma das pressões monitoradas tem que ser identificada para evitar alarmes falsos. São possíveis esquemas para, seletivamente, inibir o monitoramento de algumas medidas de pressão em resposta a alguns eventos, enquanto continua a monitorar as pressões que não são afetadas. É um contraste aos sistemas baseados na conservação da massa, que falham somente quando são incapazes de identificar vazamento nos dados.



Não fornece estimativa de quantidade vazada nem localização do vazamento.

O *Pressure Point Analysis* pareceria ser o melhor para pequenos oleodutos transportando fluidos incompressíveis que operam quase que no estado estacionário, o que não é comum em transporte de petróleo e derivados. Sistemas maiores, linhas transportando fluidos compressíveis e linhas com transientes freqüentes, usando esse sistema, teriam um alto número de alarmes falsos e/ou têm o sistema de detecção inibido um muitas vezes. Se o sistema tem medidores de vazão disponíveis, um sistema baseado na conservação da massa forneceria um *backup* ao sistema de análise de pressão. As instalações para ter mais sucesso, devem utilizar outras medidas, além da medida de pressão, para avisar o sistema de eventos os quais causam transientes que têm as mesmas características de um vazamento, ou fornecem outras informações importantes para evitar alarmes falsos. O método não é limitado pela precisão dos medidores de vazão, como método baseado em modelo fenomenológico e isso resulta em menos custo por não requerer medidores mais sensíveis.

#### 2.2.4. Método experimental

DINIS *et alli* (1998), apresentou um método estatístico baseado na estimação e teste, para detectar vazamentos em tubulações de líquidos submersas quando a vazão de entrada não é conhecida e os métodos convencionais de balanço de massa não podem ser utilizados. O método utilizado nestas situações é “predizer” a vazão de entrada de um modelo de poço/reservatório estacionário para uso em um simulador transiente de tubulação.

A técnica demonstrada utiliza um modelo de perda de pressão para o qual é necessária uma rotina de produção de dados. As flutuações devido à turbulência, transientes e erros de medida são tratadas como ruído estatístico.

O modelo analítico de uma tubulação vazando, mostrado por DINIS *et alli* (1998), baseia-se na equação de Darcy-Weisbach que fornece uma estimativa da perda de pressão para o escoamento de um líquido, em uma tubulação horizontal sob regime permanente turbulento. Segundo DINIS *et alli* (1998), a altas vazões as quais são

comuns em produção de óleo e gás, o fator de fricção se torna aproximadamente uma constante a qual é somente uma função da rugosidade relativa da tubulação e não mais uma função do número de Reynolds. O método considera a diferença de pressão entre a entrada e a saída da tubulação, e o coeficiente de resistência,  $R$ , definidos como nas equações 2.28 e 2.29. Assume-se que os valores de  $R$  são aproximadamente normalmente distribuídos, a fim de aplicar o Teorema do Limite Central, que pode ser encontrado em mais detalhes em MEYER (1983), a população de médias de amostras de  $R$  aproxima da distribuição normal. Também se assume que as variâncias de  $R$  com e sem vazamento são iguais. A lógica aqui é que, para a mesma tubulação, a dispersão estatística deveria ser aproximadamente a mesma. Os transientes induzidos pelo poço devem também ser os mesmos para a tubulação com e sem vazamento. A variação de pressão, segundo POTTER e DINIS (*apud* DINIS *et alli*, 1998), é:

$$p_{in} - p_{out} = \Delta p = RQ_{out}^x, \quad (2.27)$$

sendo,

$$R = \frac{8f\rho L_p}{\pi^2 d^5}, \quad (2.28)$$

onde:  $p_{in}$  é a pressão na entrada da tubulação,

$p_{out}$  é a pressão na saída da tubulação,

$Q_{out}$  é vazão na saída da tubulação,

$x$  é expoente empírico,

sendo que as unidades devem ser compatíveis.

O valor de  $x$  é relacionado com a rugosidade e é uma característica de cada tubulação, pode ser determinado por teste de vazões ou por correlações teóricas da literatura.

O método utiliza a comparação de um valor antigo e um valor atualizado do coeficiente de resistência da tubulação,  $R$ . O novo valor representa o potencial de vazamento e o valor antigo, é  $R$  sem vazamento.

Aplicando logaritmo a equação (2.28),

$$\log(\Delta p) = \log R + x \log Q_{out} \quad (2.29)$$

o qual é uma linha reta em um gráfico log-log de  $\Delta p$  contra  $Q_{out}$  com coeficiente angular  $x$  e coeficiente linear  $R$ .

De acordo com DINIS *et alli* (1998), o modelo matemático de uma tubulação vazando se baseia em duas considerações referentes a queda de pressão. A primeira consideração é que a pressão no ponto do vazamento não é afetada pelo vazamento. A segunda consideração é que a queda de pressão do vazamento é proporcional ao quadrado da vazão de  $Q_1$ , com uma constante de proporcionalidade  $F_1$  representando o tamanho do vazamento. Esta consideração significa que a queda de pressão do vazamento pode ser descrita por uma equação do orifício.

A vazão de entrada é a de saída mais a vazão do vazamento:

$$Q_{in} = Q_{out} + Q_1 \quad (2.30)$$

A relação entre o  $c$ , e o coeficiente de resistência sem vazamento,  $R$ , é, DINIS *et alli* (1998)

$$R_1 = R \left[ (Q_{LD}^2 + 2Q_{LD}) L_{LD} + 1 \right] \quad (2.31)$$

sendo  $Q_{LD}$  vazão relativa do vazamento,  $Q_{LD} = \frac{Q_1}{Q_{out}}$  (2.32)

e  $L_{LD}$  a localização relativa do vazamento,  $L_{LD} = \frac{L_1}{L_p}$  (2.33)

Da equação (2.33) conclui-se que  $R_1$  pode ser igual ou maior que  $R$ , e que,  $R_1$  é igual a  $R$  quando  $L_1 = 0$  ou quando  $Q_1 = 0$ . Também é possível perceber, através da mesma equação que para a vazão de vazamento,  $R_1$ , esta é maior que  $R$  quando a localização do vazamento é mais próxima da saída. Como o método baseia-se na diferença entre a  $R_1$  e  $R$ , pode-se concluir que quanto mais próximo da extremidade de saída da tubulação estiver o vazamento, mais precisa será a sua determinação.

### Modelo de detecção de vazamentos

O teste estatístico a ser realizado depende da quantidade de medidas de  $R$  disponíveis, e as hipóteses testadas pelo método são:

$$H_0: R_1 = R \text{ (sem vazamento)} \quad (2.34)$$

e

$$H_A: R_1 > R \text{ (vazamento)} \quad (2.35)$$

Se  $H_0$  é aceito conclui-se que a tubulação não está vazando ou que o vazamento é suficientemente pequeno para passar despercebido.

Além disso, o efeito da posição na detectabilidade do vazamento é dada pela seguinte equação de DINIS *et alli* (1998):

$$\frac{Q_l}{Q_{in}} = 1 - \left[ 1 + L_{LD} \left( \frac{2.33 \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1} + \frac{\sigma^2}{n}}}{R} \right) \right]^{-\frac{1}{2}} \quad (2.36)$$

A equação (2.38) dá o mínimo tamanho de vazamento detectável para diferentes posições de vazamentos.

O método também possibilita calcular o tamanho e a localização do vazamento após ele ter sido detectado, da forma apresentada por DINIS *et alli* (1998) e reproduzida a seguir.

Escrevem-se duas equações para pressão no ponto de vazamento; primeiro considerando uma seção da entrada até o vazamento e segundo, considerando do vazamento até a saída:

$$p_1 = p_{in} - \frac{R}{L_p} (Q_{out} + Q_l)^2 L_l \quad (2.37)$$

$$p_1 = p_{out} + \frac{R}{L_p} Q_{out}^2 (L_p - L_l) \quad (2.38)$$

A vazão vazada  $Q_l$  depende da diferença entre a pressão dentro da tubulação no ponto do vazamento e a pressão do ambiente submarino ( $p_e$ ) fora da tubulação. Considerando a vazão através do orifício, a queda de pressão pelo vazamento para uma única fase líquida é dada por BEGGS (*apud* DINIS *et alli*, 1998) como,

$$\Delta p_{leak} = p_1 - p_e = \xi \gamma_L \frac{Q_l^2}{d_{or}^4} = F_l Q_l^2 \quad (2.39)$$

Resolvendo para a pressão dentro da tubulação no ponto do vazamento  $p_1$  dá:

$$p_1 = p_e + F_l Q_{leak}^2 \quad (2.40)$$

A equação (2.42) junto com as equações (2.39/2.40) forma um sistema de três equações e quatro incógnitas  $L_l$ ,  $F_l$ ,  $Q_l$  e  $p_1$ . O sistema pode ser resolvido pelo teste de duas vazões diferentes, DINIS (1998).

### Vantagens e desvantagens

A detectabilidade do vazamento varia com a localização do vazamento, melhorando com a aproximação do vazamento da extremidade final da tubulação. Esse problema pode ser reduzido com a instalação de um ou mais sensores de pressão mais próximos da entrada da tubulação, então o método pode ser aplicado para pequenas seções da tubulação.

O coeficiente de resistência  $R$  precisa ser atualizado periodicamente, porque mudanças na rugosidade relativa da tubulação alteram o fator de fricção e conseqüentemente o  $R$ , o que pode causar alarmes falsos.

A grande influência dos efeitos transientes e da turbulência na detecção de vazamentos através deste método é crítica. Esses efeitos, assim como os erros dos

instrumentos, são encarados como ruído, no entanto, segundo DINIS (1998), a detecção melhora quando o ruído da tubulação (variância das medidas de R) decresce.

A técnica apresentada somente foi testada experimentalmente e utilizava água como fluido em escoamento, o que a descredencia, pelo menos sob o ponto de vista de confiabilidade, para ser usada na indústria de petróleo.

## 2.3 SOFTWARE COMERCIAL DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

### 2.3.1 LeakWarn<sup>®</sup>

O LeakWarn<sup>®</sup> é um *software* de detecção de vazamentos, baseado em balanço volumétrico compensado (MCVB), com modificações para abordagens transientes, de acordo com MACTAGGART *et alli* (1995), já apresentado na secção 2.4.2., opera em tempo real, e é pertencente a empresa canadense Simulations,

O sistema utiliza os valores de temperatura, pressão, vazão e densidade medidas a cada segmento de tubulação para calcular o balanço de volume, como abaixo:

$$V_{in} - V_{out} = \Delta LP \quad (2.41)$$

Sendo  $V_{in} - V_{out}$  a diferença entre o volume entrando e saindo da tubulação sobre um intervalo de tempo e  $\Delta LP$  a alteração no volume (*line pack*) da tubulação sobre o mesmo intervalo de tempo.

O cálculo da mudança na compactação ( $\Delta LP$ ) leva em conta os valores de temperatura e pressão obtidos do sistema de aquisição de dados. Segundo Simulations (2000), o LeakWarn<sup>®</sup> executa ajustes contínuos para produtos com composição variável, temperatura e densidade. É capaz também de considerar os efeitos de diferentes bateladas sequenciais de produtos ao longo da tubulação.

Segundo MACTAGGART *et alli* (1995), a compactação da linha é recalculada a cada ciclo do SCADA a fim de determinar as mudanças do ciclo anterior. Os volumes e as mudanças na compactação são integradas em diversos intervalos de tempo

chamados janelas de tempo, para filtrar os efeitos de erros repetitivos. O desequilíbrio da equação é constantemente monitorado e comparado com os limites das janelas de tempo. Pequenos intervalos de tempo são utilizados para detectar vazamentos, evitando alarmes falsos por operações transientes e erros repetitivos da instrumentação. Intervalos grandes de tempo são empregados para detectar pequenos vazamentos e evitar alarmes falsos em virtude medidas de vazão com erro acumulado. Limites de detecção estáticos são dinamicamente aumentados durante operações transientes para evitar alarmes falsos causados por imprecisões inerentes ao cálculo da compactação da linha.

O usuário tem as informações de detecção de vazamento, de batelada e monitoramento da tubulação, fornecidas pelo LeakWarn<sup>®</sup>, disponíveis através de uma interface gráfica, como análises de tendências, Signature Plot<sup>®</sup>, perfis hidráulicos, histogramas de *desequilíbrio volumétrico*.

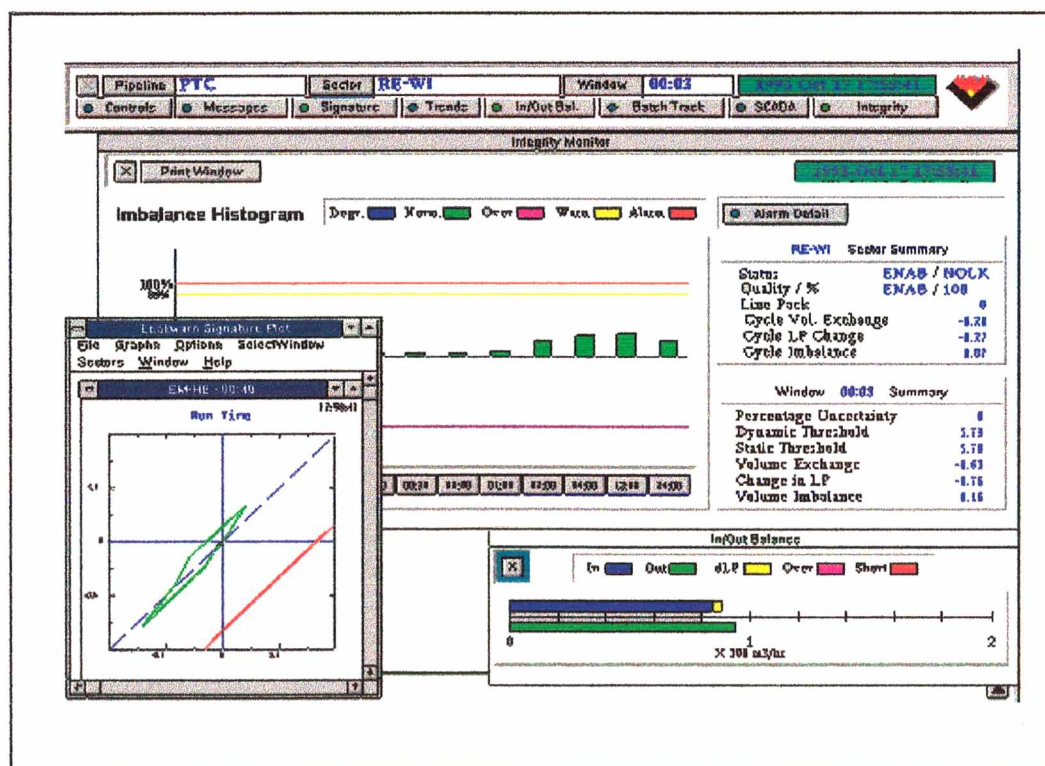


Figura 2. 10 - Tela do LeakWarn – retirado de Simulations (2000 )

O Signature Plot<sup>®</sup>, mostrado na figura 2.10 no canto inferior esquerdo, é um gráfico X-Y da compactação da linha contra a mudança de volume na secção da

tubulação. De acordo com CRAMER *et alli* (2000) e a figura 2.11, se o gráfico desses valores permanecerem na linha de 45°, a tubulação está operando em regime permanente. Se a linha for para cima e para a direita, significa que a quantidade de fluido na linha está aumentando devida a compactação. No caso da linha se mover para baixo e para a esquerda, há descompactação na linha. Quando a linha se movimenta para fora do campo dos 45°, é indicativo de operação anormal, que pode ser falhas de instrumentação ou vazamento.

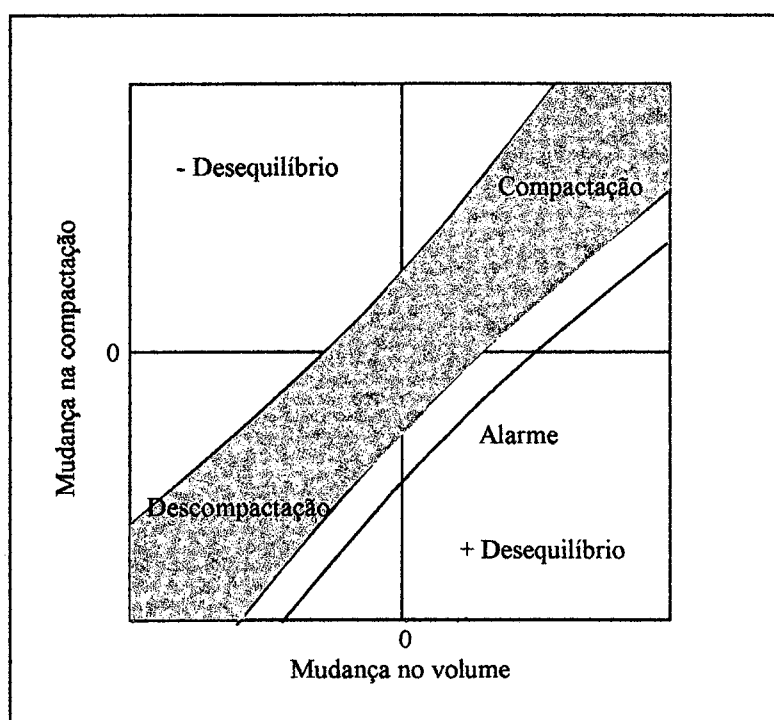


Figura 2. 11 - Signature Plot ©

A variação no volume é a diferença na quantidade de fluido entrando e saindo da tubulação no mesmo período de tempo. Este valor é dependente da precisão dos medidores de vazão, no entanto, de acordo com MACTAGGART *et alli* (1995) a maior fonte de erros é a correção para as condições padrão (conversão de volume total para volume líquido). A precisão das medidas de temperatura e pressão, composição do produto e a equação de estado podem afetar a precisão do volume líquido.

A variação na compactação também reflete a diferença entre o volume entrando e saindo da tubulação sobre um intervalo de tempo, no entanto é computado



independentemente da variação de volume. A compactação é uma função das dimensões do duto, pressão, temperatura e da equação de estado, e do próprio fluido.

Além de ajudar na detecção de vazamentos, o *Signature Plot*® também pode ser utilizado na identificação de outros problemas na tubulação, como erro na compressibilidade do produto, medida de vazão errática, entre outros.

### **2.3.2 LeakFinder**

O LeakFinder é um *software* de detecção de vazamentos pertencente a Stoner Associates. Utiliza um modelo baseado na compensação do volume para calcular desbalanceamentos volumétricos na linha e em paralelo, outro método de análise de assinaturas de vazamentos que se mostram nos padrões de pressão.

É utilizado para tubulações transportando petróleo cru e derivados, além de gás natural, SPS (2001).

### **2.3.3 Pipeline Leak Detection System (PLDS)**

Este *software* pertence a Energy Solutions Int. É baseado no *Model-compensated volume balance approach*, conhecido com MCVB, com abordagem transiente. Assim, o método de funcionamento desse sistema é através da comparação em tempo real dos valores de vazão medidos e os calculados pelo modelo, Energy Solutions Int. (2001).

## 2.4 PRINCIPAIS PARÂMETROS DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE DETECÇÃO DE VAZAMENTOS

O desempenho de um *software* de detecção de vazamentos pode ser avaliado através de quatro parâmetros, confiabilidade, sensibilidade, robustez e precisão.

A confiabilidade é relacionada a capacidade do sistema detectar um vazamento e transmitir essa informação. É uma característica muito importante no desempenho desses sistemas, operar sem alarmes falsos.

A precisão tem relação com a validade das características do vazamento informado, como a vazão, localização, volume vazado e tempo de vazamento.

A robustez mede a capacidade do sistema de detecção continuar operando e fornecendo informação correta ainda que sob mudanças na condição operacional do duto ou com dados perdidos.

A sensibilidade é relacionada com o tamanho do vazamento e o tempo necessário para detectá-lo. A capacidade de informar um vazamento no menor tempo possível é de vital importância para minimizar a quantidade vazada, figura 2.12.

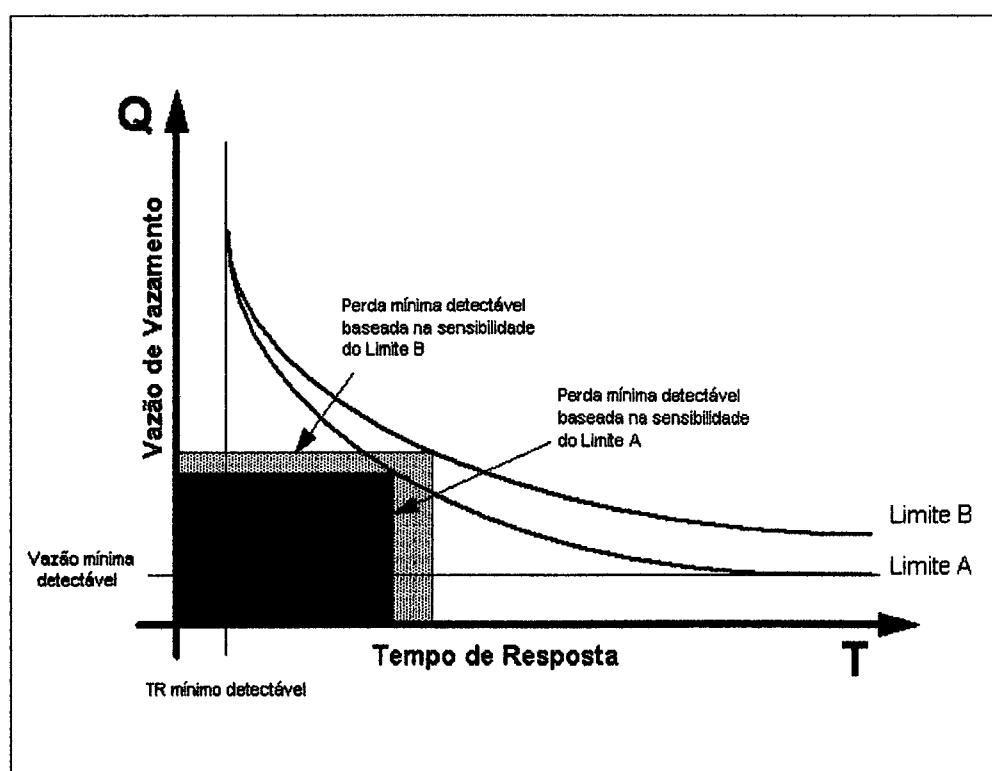


Figura 2. 12 – Curvas de sensibilidade para diferentes limites de operação

### 3 DESCRIÇÃO DO SIMULADOR

Nesta seção, apresenta-se uma tradução livre comentada do manual do usuário do simulador Liqnet utilizado. Serão apresentados a sua forma de organização, a sua estrutura de cálculo e as equações que utiliza. Como se trata de propriedade industrial de terceiros, não há divulgação de detalhes tecnológicos de seu conteúdo.

#### 3.1 SIMULADOR LIQNET

O simulador de escoamento de líquidos empregado foi o *software* de propriedade industrial da empresa Energy Solutions International Inc, chamado Liqnet, *Liquids Network Simulator*, o qual a PETROBRAS/CENPES detém uma cópia licenciada.

Utilizando simulador de escoamento de líquidos, Liqnet, foram simulados vazamentos em várias posições em um duto pré-definido, de interesse, com o intuito de caracterizar o comportamento de pressão em situações de operação normal de bombeamento e em situações de vazamento.

O LiqNet é um *software* de simulação de escoamento de líquidos em regime permanente e transiente em redes de polidutos. Possui interface gráfica e permite a exportação de dados para outros aplicativos, através da geração de relatórios em arquivos com formatos reconhecidos por outros aplicativos.

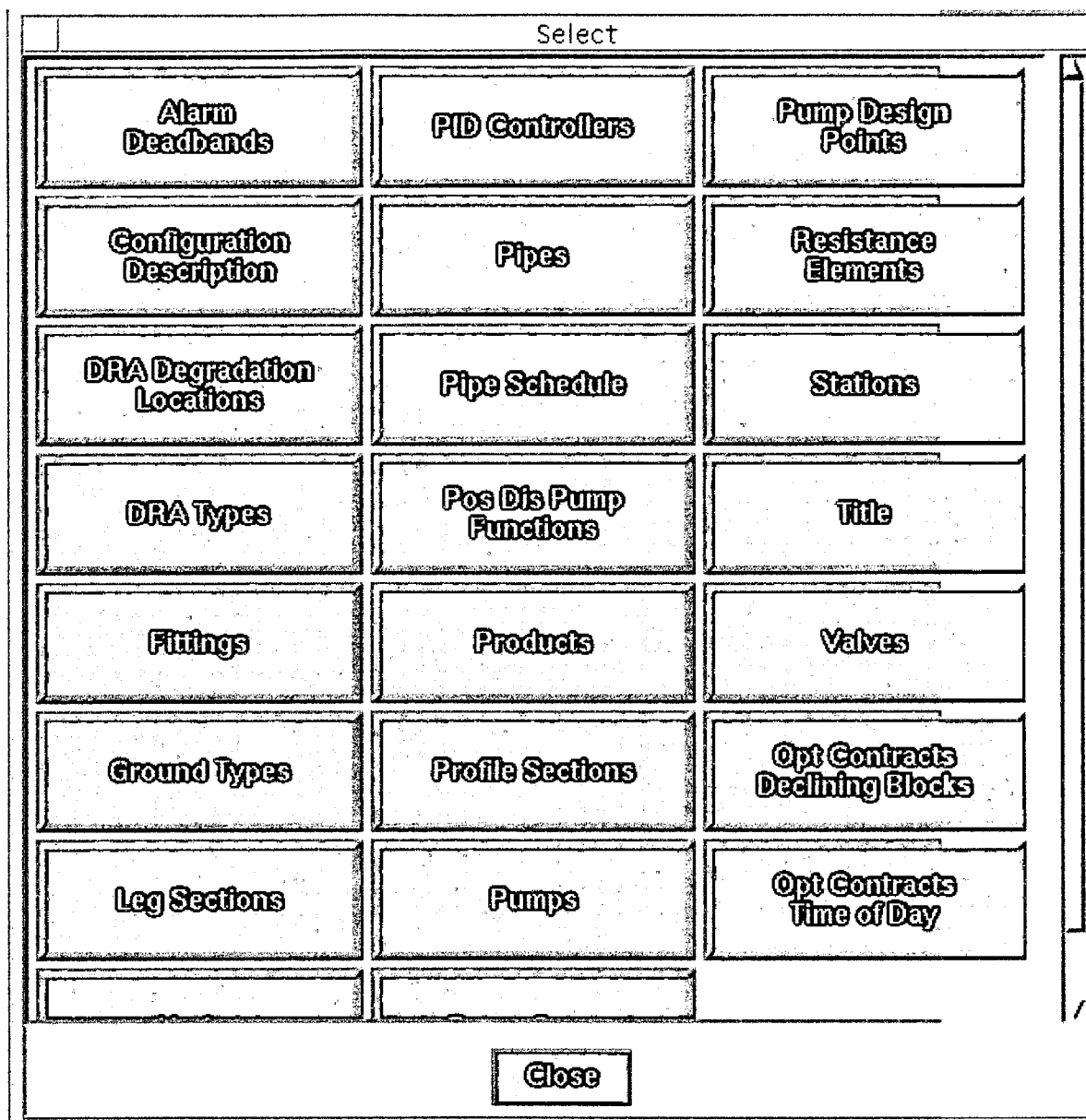
A simulação da vazão é feita pela integração numérica das equações da continuidade, do movimento e da energia, levando em conta os efeitos da pressão, temperatura, composição do fluido e os instrumentos de controle. O modelo de escoamento no regime permanente pode ser usado como ferramenta autônoma de análise ou como um instrumento para gerar perfis iniciais para o modelo de vazão transiente. O modelo transiente é usado para executar as simulações dinâmicas e caracteriza uma solução de diferença finita implícita da equação transiente, utiliza o

método de Keller-Box, TANNEHILL (1997). Ambos têm capacidade de modelar tubulação, válvulas, elementos de resistência e estações de bombeamento. O modelo de tubulação permite simular o transporte de bateladas de diferentes fluidos, inclusive perfis de interface, cálculos do fator de fricção com as condições locais, incluindo efeitos de DRA ("Drag Reducer Agents" aditivo utilizado para reduzir a viscosidade do fluido), e um balanço de energia e fluxo de calor do solo. O modelo de estação de bombeamento inclui mecanismo de *feedback* para o controle do *setpoint* e curvas características para o cálculo das bombas individuais.

O simulador contém três módulos principais. São eles: *Engineering Library*, *Configuration* e *Case*.

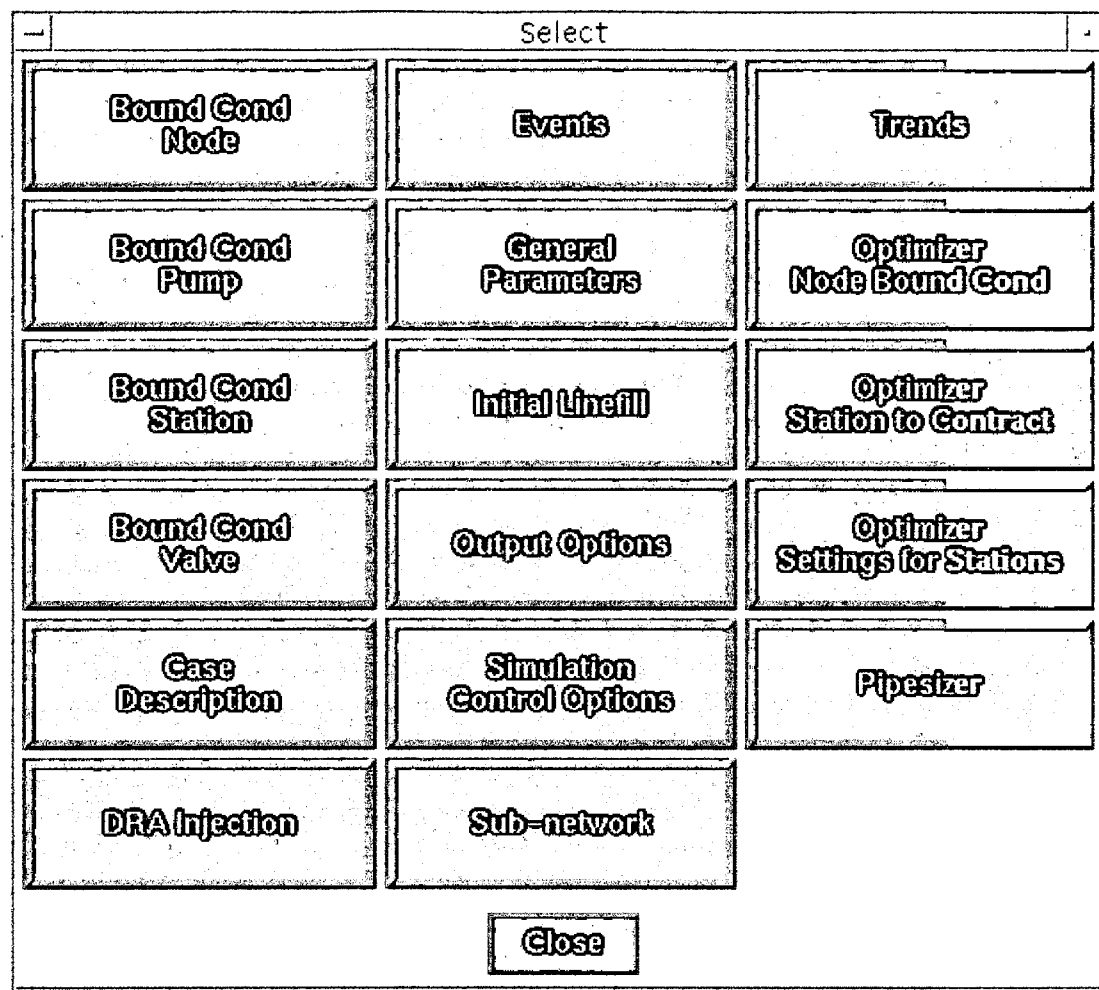
O módulo *Engineering Library* do simulador, é uma coleção de tabelas contendo dados comuns a vários oleodutos. As tabelas incluem as propriedades dos fluidos, os tipos de solos, tipos de conexões, os tipos de fluido e tabelas de tubulação e, que é uma espécie de referência normatizada pelo API para tipos padrões de tubulações.

O módulo *Configuration* é uma coleção de tabelas contendo dados que fornecem a descrição física do oleoduto que não muda com a variação nas condições de operação. Os dados do *Configuration* incluem a definição dos dutos, tabela de definição do otimizador e a *Engineering Library* utilizada. O otimizador é um outro módulo do Linqet, especificamente dedicado a otimização de custos de bombamento, que não serviu a este trabalho. É também dentro desse módulo, que é possível alterar a precisão dos cálculos em relação a discretização do duto em relação a distância.



**Figura 3. 1 - Tela de opções do módulo *Configuration***

O módulo *Case* é uma coleção de tabelas que definem o cenário da simulação e contém os resultados de sua execução. Os casos simulados são armazenados como conjuntos de dados sob condições específicas da tubulação. No *Case* estão configurados as condições de contorno, o *status* dos equipamentos, o inventário inicial da tubulação, eventos operacionais e opções do modelo, que será tratado em maiores detalhes na seção 3.4. A saída do *Case* inclui relatórios em formatos fixos e gráficos, sendo que os relatórios podem ser exportados para outros aplicativos.



**Figura 3.2 - Tela de opções do módulo Case**

### 3.2 CÁLCULOS HIDRÁULICOS DO DUTO

O duto pode estar operando em regime transiente ou permanente. O Linqet é capaz de simular escoamentos em ambos regimes.

Os resultados da simulação em regime permanente podem ser usados para fornecer condições iniciais para simulações transientes.

O modelo utilizado pelo simulador baseia-se nas equações de conservação da massa, momento linear e energia para descrever o movimento do fluido no interior do duto.

Para uma descrição completa do processo físico é necessário definir as condições de contorno para as equações, e no caso de regime transiente, as condições iniciais. Para o escoamento no oleoduto, as condições de contorno são pressão e vazão em cada ponto onde há entrada ou saída de fluido da tubulação, e a temperatura do fluido em cada ponto de entrada. As condições iniciais são a pressão, temperatura e velocidade em cada ponto do modelo.

Se houver instrumentos de controle no oleoduto, como válvulas ou estação de bombeamento controlada, é necessário, também, definir os *setpoints*.

### 3.3 ESTRUTURA DO MODELO DO LIQNET

O modelo de duto do Linqnet é composto de *legs* e *nodes*. Um *leg* é um componente da tubulação através da qual o fluido escoar, tais como o tubo, válvula, estação de bombeamento. *Legs* são conectadas em junções, referidas como *node* no modelo.

Os cálculos dos dutos são feitos em subdivisões chamadas *knot*. Essa subdivisão estabelece a distância entre os *knots* em cada tubo. Como regra geral, adicionando mais *knots* aumenta a precisão do modelo, entretanto o tempo de execução também aumenta. Há limites, no entanto para essa regra: uma *leg* não pode ter mais que 200 *knots*, (caso contrário deverá ser desdobrada em duas ou mais *legs*). As equações diferenciais do movimento são resolvidas para valores de vazão nos *knots*. (Os *knots* constituem os nós, ou elementos de discretização da malha de solução por diferenças finitas, usando o método de Keller-Box). As estações de bombas e válvulas têm versões mais simples das equações de vazão do que as tubulações, geralmente baseadas em dados empíricos, descrevendo a relação entre a vazão e a diferença entre a pressão de entrada e saída.

Os *nodes* são caracterizados pela sua pressão, temperatura e a necessidade da conservação da energia e massa em relação a entrada e saída do *node*. A pressão no *node* é a mesma do *knot* no final de cada *leg*. A figura a seguir mostra a tela do Linqnet aonde são definidos os *nodes* e *knots*.

Knot step (Km)	Pipe name	Node 1	Node 2	Length (Km)
0.20	F10	montante	R10	10.00
0.20	F15	R10	pico#1	5.00
0.20	F20	pico#1	vale#1	5.00
0.20	F40	vale#1	pico#2	20.00
0.20	F45	pico#2	R45	5.00
0.20	F50	R45	jusante	5.00
0.20	FUp45	R45	v45up	1.00
0.20	FDn45	v45Dn	jusant45	1.00

Figura 3. 3 - Tela de definição de nodes e knots

Há modelos separados para *leg* e *node*. Cada *leg* é um modelo individual que calcula a vazão e outras variáveis nos *knots*. O modelo do *node* é uma solução implícita global da pressão, temperatura e vazão entrando no *node*.

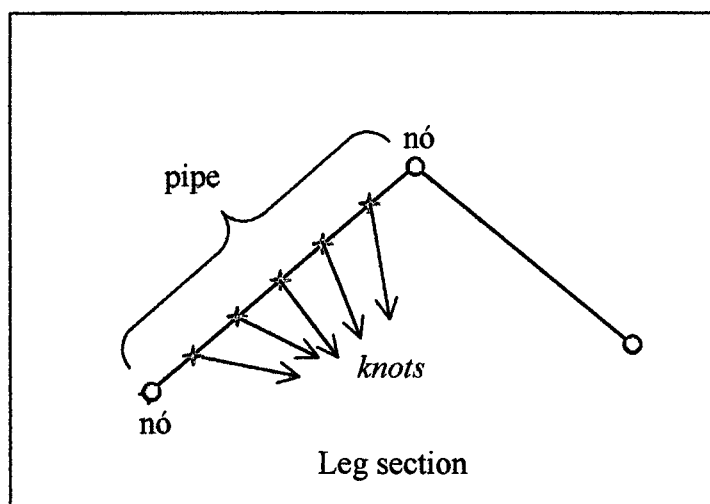


Figura 3. 4 - Esquema da estrutura de resolução do Lqnet

### 3.4 PROCEDIMENTO DE CÁLCULO

O Lqnet resolve o modelo do *leg*, alternativamente, usando o valor de pressão e temperatura do nó como condição de contorno, e no modelo do nó, usando pressão/vazão derivadas dos modelos do *leg*. Essa abordagem resulta em um cálculo



rápido quando comparado ao modelo global da rede, já que a matriz que tem que ser invertida para a pressão do nó é muito menor do que seria se contivesse todos os *knots*.

O modelo permanente inclui dois tipos de cálculos, um modelo “*linear*” e um modelo “*relaxation*”. O modelo linear usa um balanço de massa simples, (que se trata de um balanço volumétrico com correção para temperatura, que, em regime permanente, é sinônimo de balanço material, pois o transiente sônico já acabou, que é o responsável pela variação volumétrica devido à pressão), para calcular as vazões e mudanças de temperatura e pressão da origem até o final da tubulação. Em contraste ao método iterativo, o método “*linear*” fornece uma solução rápida e exata; entretanto é somente aplicável a configurações lineares de dutos, ou seja, sem tubulações laterais e somente *loops* com uma tubulação por segmento. Para redes de dutos, é usado o modelo *relaxation* iterativo. Trata-se de uma variação do modelo de Gauss Sidel para resolução numérica da matriz gerada.

Execution mode	<input checked="" type="checkbox"/> Transient Model
Initialization mode	<input checked="" type="checkbox"/> Steady State Model
Start time (hh:mm:ss)	00:00:00
Start date (mm/dd/yy)	01/01/00
Simulation length (min)	10.00
Calculation time step (sec)	0.00
Execution speed factor	0
Warm start filename	110_WARM.BIN
Steady state model	<input checked="" type="checkbox"/> Relaxation
Max relaxation iterations	5000
Max transition iterations	100
Convergence limit (%)	0.00

Figura 3. 5 - Tela de definição de opções de resolução

### 3.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE OS MODELOS DE TUBULAÇÃO

Alguns problemas comumente encontrados em simulação de escoamentos são aqui analisados.

#### 3.5.1 O modelo em regime permanente não converge

Este problema é geralmente causado: por vazões muito baixas através de partes do sistema conectadas a outras partes com altas vazões, pelas bombas sendo forçadas a operar fora da sua faixa normal de operação, ou por tubulações muito curtas.

Outra causa comum de problemas é a sobre especificação. Não é possível simultaneamente controlar a vazão e a pressão no mesmo ponto. Isto é uma impossibilidade física, não uma limitação do modelo. É possível especificar as extremidades inicial e final do duto, respectivamente da seguinte forma:

- pressão e vazão,
- vazão e pressão,
- pressão e pressão.

Não é possível, no entanto, especificar as vazões nas extremidades, pois a vazão corrigida (calculada na base padrão de temperatura) é constante durante a operação em regime permanente, o que permite uma infinidade de composições de pressão à nos contornos do duto.

Existem outras formas não tão óbvias de especificar pressão e vazão no mesmo ponto. Por exemplo, no caso em que a vazão ao longo do duto é fixa pela especificação nas condições de contorno do nó e os *setpoints* da estação são violados. A fim de operar dentro dos *setpoints*, o controle da estação irá reduzir a vazão (pela redução da velocidade da bomba ou fechando a válvula de controle á jusante da bomba). Como os valores de vazão calculados da estação e as condições de contorno são diferentes, este caso não tem solução para o regime permanente, e o modelo irá divergir.

### 3.5.2 O modelo transiente é instável

Pelo uso de métodos numéricos implícitos, o Liqnet evita as instabilidades numéricas habituais causadas por pequenos e/ou grandes passos de tempo. A maioria das instabilidades são causadas por mudanças nos parâmetros calculados externamente (densidade a partir da equação de estado, fator de fricção, ou variáveis controladas pela malha de controle por realimentação).

### 3.5.3 Instabilidades nas equações de estado

Somente ocorrerão instabilidades nas equações de estado a pressões demasiadamente baixas, tipicamente características de mudanças de fase líquido para vapor. Para líquidos, antes de uma instabilidade, a simulação terminará com uma mensagem de pressão negativa. Para fluidos do tipo NGL (*Natural Gas Liquids*), o ponto de vapor poderá ser a uma alta pressão e o modelo se tornará instável. A solução é modificar as condições de contorno ou setpoints de forma a elevar a pressão.

### 3.5.4 Instabilidades no fator de fricção

Como uma regra geral, o fator de atrito é maior no regime laminar que no turbulento. Há, no entanto, uma zona de transição para Reynolds entre 1000 e 5000 onde há inversões desses comportamentos. As instabilidades no fator de fricção ocorrem na zona de transição entre o escoamento laminar e turbulento. A altas vazões, o escoamento é turbulento, produzindo um alto fator de fricção. No próximo passo de cálculo, a vazão decresce, produzindo vazão laminar e fator de fricção. No próximo passo, o baixo fator de fricção eleva a vazão, produzindo turbulência e assim por diante.

Uma das soluções é utilizar pequenos passos de tempo. Outra alternativa é deslocar a região de transição de forma que o valor de vazão passe mas rapidamente através da zona de transição.

É importante ressaltar que as instabilidades de vazão na zona de transição podem ser reais, entretanto o modelo não as simula de forma satisfatória.

O modelo limita o máximo valor do fator de fricção de modo a prevenir instabilidades em números de Reynolds muito baixos.

### 3.5.5 Instabilidades na realimentação

São comuns em tanto em modelos como em dutos reais as instabilidades por realimentação. Uma malha de realimentação negativa na qual a diferença entre o setpoint e o valor corrente produz uma alteração para levar o valor mais próximo do setpoint, é por natureza um oscilador.

Para o controle do setpoint da estação de bombeamento, o Linqet utiliza um mecanismo de controle por realimentação, com controle da válvula de descarga e controle à jusante para bombas centrífugas de velocidade constante. Se o sistema oscila, pode-se modificar as constantes de controle e assim reduzir as oscilações.

### 3.6 Alguns problemas encontrados

Podem ocorrer alguns problemas de convergência no modelo em regime permanente devido a definição de dutos muito curtos.

O modelo transiente, ainda que usando método numérico implícito de solução, é suscetível a instabilidades, devido a definição de pequenos passos de cálculo. O passo de cálculo tem valor mínimo limite definido pelo *software* e não traz essa informação em seu manual, mas por inferência em simulações realizadas pode ser levantado (engenharia reversa).

O número de das subdivisões (*knots*) de cada tubulação definida, tem número máximo restrito (200 *knots* por *leg*).

O simulador gera relatórios de dados exportáveis para outros aplicativos, no entanto não é possível definir quais variáveis devem fazer parte do relatório. Todos os relatórios gerados têm formato pré-definido.

### 3.7 KELLER BOX E MODIFIED BOX METHODS

O Lignet utiliza para a resolução das equações de escoamento, apresentadas anteriormente, o método de Keller, *Keller box method*. Esse método, é um esquema de resolução por diferenças finitas implícito, utiliza-se para PDE (equações diferenciais parciais) parabólicas com precisão de segunda ordem no espaço e no tempo. A derivada de ordem mais alta é substituída pela introdução de variáveis adicionais, resultando um sistema de primeira ordem.

Keller e Cebeci (*apud* TANNEHILL, 1997), aplicaram o esquema *box-difference* às equações do momento linear e continuidade da camada de contorno, depois que elas foram transformadas em uma única PDE de 3ª ordem. A PDE de 3ª ordem é escrita como um sistema de três PDE de 1ª ordem utilizando as variáveis definidas de forma semelhante ao procedimento comumente empregado na solução numérica de ODE de 3ª ordem. O esquema *box-differencing* com a linearização de Newton é então aplicada as três PDE's de 1ª ordem, dando origem a um sistema bloco tridiagonal tendo 3X3 blocos, o qual é resolvido por um esquema de eliminação de blocos.

A partir das equações do momento linear e da energia, já apresentadas em 3.8.6, e da malha apresentada na figura 3.6, procede-se a discretização que pode ser encontrada em detalhes em TANNEHILL (1997).

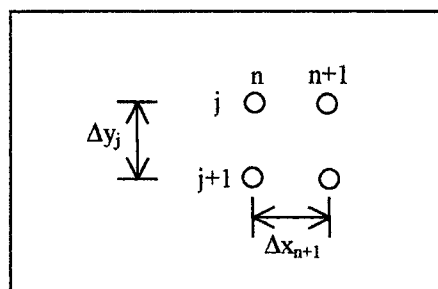


Figura 3. 6 - Malha para o método "modified box"

As equações discretizadas resultantes são linearizadas através da linearização de Newton e assim, a equação do momento linear acoplada a equação da continuidade podem ser resolvidas através do esquema modificado de eliminação tridiagonal, que pode ser encontrado em TANNERHILL (1997). A equação da energia é geralmente resolvida de forma desacoplada e as propriedades (incluindo a viscosidade turbulenta) são atualizadas iterativamente como desejado ou requerido pelas restrições de precisão.

### 3.8 EQUAÇÕES UTILIZADAS PELO LIQNET

É essencial uma predição correta das propriedades dos fluidos para modelar corretamente o processo físico. O Lqnet diferencia os fluidos em dois tipos: os *LIQ*, que seriam fluidos que nas condições ambientais são líquidos, e os *NGL* (*Natural Gas Liquids*), que são líquidos sob condições especiais de alta pressão.

#### 3.8.1 Densidade

A densidade é calculada nos pontos de contorno, através da temperatura e pressão medidas ou especificadas. Nos pontos internos do modelo, a densidade é calculada a partir do balanço de massa; a temperatura, a partir do balanço de energia; e a pressão é calculada a partir da equação de estado.

Para líquidos, a equação de densidade usada é

$$\rho = \rho_0 \left[ 1 + \frac{P - P_0}{\beta} \right] [1 - \alpha(T - T_0)], \quad (3.1)$$

onde:

$\rho$  = densidade, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

$\rho_0$  = densidade de referência, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

$P$  = pressão, psi ou Pa

$P_0$  = pressão de referência, psi ou Pa

$T$  = temperatura, R ou K

$T_0$  = temperatura de referência, R ou K

$\beta$  = módulo de Bulk, psi ou Pa

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica, 1/R ou K

Para NGL, o *software* utiliza a equação de estado BWRS:

$$P = \rho R_g T + \rho^2 [B_0 R_g T - A_0 - C_0 T^{-2} + D_0 T^{-3} - E_0 T^{-4}] + \rho^3 + [b_0 R_g T + (a_0 + d_0 T^{-1})(\alpha \rho^3 - 1)] + c_0 (1 + \gamma \rho^2) \rho^2 T^{-2} \exp(-\gamma \rho^2) \quad (3.2)$$

### 3.8.2 Viscosidade

O Liqnet usa a equação empírica de Andrade, para relacionar a viscosidade à temperatura. Duas viscosidades medidas a duas temperaturas diferentes servem para determinar os coeficientes na equação, expressa por:

$$\mu = A_1 \exp(A_2 / T), \text{ onde:} \quad (3.3)$$

$\mu$  = viscosidade dinâmica, cP

T = temperatura, R ou K

$A_1$  = coeficiente empírico 1

$A_2$  = coeficiente empírico 2

### 3.8.3 Calor específico

Para os produtos líquidos, é usado um valor constante especificado pelo usuário. No caso de fluidos compressíveis, o Liqnet utiliza no balanço de energia, o calor específico a volume constante. Para NGL utiliza a equação de estado BWRS.

### 3.8.4 Módulo de Bulk

O módulo de Bulk de um fluido é definido como a variação de pressão necessária para produzir 100 % de mudança na densidade, da seguinte forma:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\Delta P}{\beta}, \text{ onde:} \quad (3.4)$$

V = volume, qualquer unidade

$\beta$  = módulo de Bulk, psi ou Pa

P = pressão, psi ou Pa

Para fluidos classificados como *LIQ*, é usado um valor especificado pelo usuário. Para *NGL*, não é necessário uma vez que a densidade é calculada a partir da equação BWRS.

### 3.8.5 Coeficiente de expansão térmica

É a mudança na densidade devido a mudança devido a temperatura, a saber:

$$\frac{\Delta V}{V} = \alpha(\Delta T), \text{ onde:} \quad (3.5)$$

V = volume, qualquer unidade

$\alpha$  = coeficiente de expansão térmica, 1/R ou 1/K

T = temperatura, R ou K

Para líquidos classificados como *LIQ*, é usado um valor definido pelo usuário, na equação de estado para o cálculo da densidade. Para líquidos tipo *NGL* não é necessário uma vez que a densidade é calculada pela equação BWRS.

### 3.8.6 Equações de vazão da tubulação

A seguir, são apresentadas as equações utilizadas pelo Linqet para descrever o escoamento no duto. São equações diferenciais parciais, que se diferenciam das apresentadas na seção de Revisão bibliográfica, pois estas, por se tratarem das equações utilizadas pelo simulador, não necessitam ser explicitadas em forma de variáveis que possam ser medidas em campo, sendo assim, são apresentadas na forma em que são utilizadas pelo simulador. Estão definidas a seguir:



$$\frac{\partial(\rho A)}{\partial t} = \frac{\partial(\rho v A)}{\partial x} \quad (3.6)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} - \frac{f v |v|}{2D} - g \frac{dh}{dx} - v \frac{\partial v}{\partial x} \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -V \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{1}{\rho C_v} T \frac{\partial P}{\partial T} \left( \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{V}{A} \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{f v^2 |v|}{2 D C_v} - \frac{4 \eta (T - T_{gnd})}{D \rho C_v} - \frac{v g \frac{dh_h}{dx}}{C_v} \quad (3.8)$$

Nas equações de (3.6) a (3.8), utilizou-se:

P = pressão, psi ou Pa

T = temperatura, R ou K

V = volume, qualquer unidade

$\rho$  = densidade, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

f = fator de fricção, adimensional

g = aceleração da gravidade, 32,17 ft/s<sup>2</sup> ou 9,81 m/s<sup>2</sup>

D = diâmetro interno do tubo, ft ou m

h<sub>h</sub> = elevação, ft ou m

A = área de secção transversal, ft<sup>2</sup> ou m<sup>2</sup>

t = tempo, s

v = velocidade do fluido, ft/s ou m/s

x = distância ao longo da tubulação, ft ou m

t = tempo, s

C<sub>v</sub> = calor específico a volume constante, Btu/lbm/R ou J/kg/K

$\eta$  = coeficiente de transferência de calor, Btu/ft<sup>2</sup>/s/R ou J/m<sup>2</sup>/s/K

T<sub>gnd</sub> = temperatura do solo, R ou K

### 3.8.6.4 Fator de fricção

O fator de fricção é uma função do número de Reynolds local, e para regime turbulento, da rugosidade do tubo.

Para regime laminar, o fator de fricção é calculado da seguinte equação:

$$f = \frac{64}{Re}, \quad (3.9)$$

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (3.10)$$

Re = é o adimensional número de Reynolds

$\rho$  = densidade, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

$v$  = velocidade do fluido, ft/s ou m/s

$d$  = diâmetro interno do tubo, ft ou m

$\mu$  = viscosidade absoluta do fluido, slug/ft/s ou kg/m/s

Para fluxo turbulento, o fator de fricção é calculado, no *software*, pela equação de Schoen:

$$f = 1,325 \left\{ -\ln \left[ \frac{e}{3,7} - \frac{1,963}{Re} \ln \left( \left\{ \frac{e}{3,7} \right\}^{\frac{10}{9}} + \frac{6,9}{Re} \right) \right] \right\}^{-2} \quad (3.11)$$

onde  $e$  é a rugosidade relativa da tubulação, adimensional

### 3.8.6.5 Expansão do tubo

A expansão do tubo, devido a pressão, é calculada da equação:

$$d = d_1 \left[ 1 + \frac{5}{6} \frac{d_1}{E \varepsilon} \right], \text{ onde:} \quad (3.12)$$

$d$  = diâmetro do tubo a pressão corrente, ft ou m

$d_1$  = diâmetro do tubo a pressão atmosférica, ft ou m

$P$  = pressão corrente, psi ou Pa

$E$  = módulo de elasticidade do tubo, psi ou Pa

$\varepsilon$  = espessura da parede do tubo, ft ou m

### 3.8.6.6 Válvulas e conexões

Em uma válvula ou conexão a vazão é relacionada a pressão pela seguinte equação:

$$Q = k_v \rho \sqrt{\Delta P \frac{\rho_w}{\rho}}, \text{ onde:} \quad (3.13)$$

$Q$  = vazão mássica, slugs/s ou kg/s

$k_v$  = coeficiente de vazão,  $\text{m}^3/\text{s}/\text{psi}^{-0,5}$  ou  $\text{m}^3/\text{s}/\text{Pa}^{-0,5}$

$\rho$  = densidade do fluido, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

$\Delta P$  = queda de pressão através da conexão, psi ou Pa

$\rho_w$  = densidade da água, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

Referências para os valores de  $k_v$  podem ser encontradas em CRANE (1978).

### 3.8.6.7 Estação de bombeamento

Para estações com bombas centrífugas, a relação entre a vazão e a pressão final é definida pelo comportamento da curva da bomba fornecida para cada bomba da estação.

## 3.8.7 Equações de troca de calor

### 3.8.7.1 Tubulações

A mudança na temperatura do tubo é calculada como parte da solução das equações do movimento do fluido dentro da tubulação.

### 3.8.7.2 Válvulas e conexões

A temperatura aumenta através da válvula devido ao aquecimento pelo atrito. O ganho de calor é igual ao trabalho feito pelo fluido, dado que o processo de passagem

é rápido, e pode ser considerado adiabático. Esse aumento de temperatura é dado pela equação:

$$\Delta T = \frac{(P_1 - P_2)}{\rho C_v}, \text{ onde:} \quad (3.14)$$

$\Delta T$  = variação de temperatura através da válvula, R ou K

$P_1$  = pressão a montante, psi ou Pa

$P_2$  = pressão a jusante, psi ou Pa

$\rho$  = densidade do fluido, slugs/ft<sup>3</sup> ou kg/m<sup>3</sup>

$C_v$  = calor específico do fluido a volume constante, Btu/lbm/R ou J/kg/K

### 3.8.7.3 Estação de bombeamento

O aumento de temperatura na estação de bombeamento é devido à fricção na bomba. Esta fricção é calculada da eficiência hidráulica da bomba, de acordo com a equação:

$$T_2 - T_1 = \frac{(1 - \tau)(P_2 - P_1)}{\tau \rho C_v}, \text{ onde:} \quad (3.15)$$

$T_1$  = temperatura a montante, R ou K

$T_2$  = temperatura a jusante, R ou K

$P_1$  = pressão a montante, psi ou Pa

$P_2$  = pressão a jusante, psi ou Pa

$\tau$  = eficiência da bomba, adimensional

### 3.8.7.4 Controle da estação

O Liqnet possui controle da estação através dos *setpoints* de válvula de controle à jusante da bomba e da velocidade.

### 3.8.7.5 Velocidade

Para a variável velocidade, o sistema simulado responde aos sinais de erro de quatro *setpoints* da estação, são eles, pressão de sucção, pressão de descarga, velocidade de operação e demanda elétrica. A resposta do controle de velocidade aos sinais de erro de cada *setpoint* é calculada da forma discreta a partir da equação de um controlador Proporcional Integral Derivativo (PID):

$$\Delta Rpm = C_{prop} \{ \Delta(Act - Set) + C_{int} \Delta t (Act - Set) + C_{der} \Delta [\Delta(Act - Set)] / \Delta t \} \quad (3.16)$$

$\Delta Rpm$  – passo de controle de velocidade

$C_{prop}$  – constante de controle proporcional

$C_{int}$  – constante de controle integral

$C_{der}$  – constante de controle derivativo

$\Delta t$  – passo de cálculo do modelo

Act – valor real da variável controlada

### 3.8.7.6 Válvula de controle de descarga da bomba

O controle da estação pela válvula de controle na descarga da bomba é realizado da mesma forma que no caso anterior. A única diferença é que a variável controlada é a vazão da estação e a realimentação é efetuada somente através dos *setpoints* das pressões de sucção e descarga.

## **4 CARACTERIZAÇÃO DAS SIMULAÇÕES**

Neste capítulo, serão descritos detalhes do duto e fluidos que foram utilizados neste trabalho. Serão apresentadas as propriedades pertinentes dos fluidos, além da caracterização estática do duto, condições de contorno e especificação de bomba.

### **4.1. FLUIDOS**

Foram escolhidos três fluidos diferentes para as simulações: óleo diesel, gasolina e GLP. Isto foi feito a fim de representar o escoamento de derivados de petróleo com características operacionais bastante diversas.

O óleo diesel situa-se dentre os fluidos “pesados”, produtos derivados de petróleo que têm como característica o alto peso molecular. É também característica desse fluido uma viscosidade maior, quando comparado com os outros derivados, e alta densidade, e em virtude disso, a grande perda de energia no escoamento ocasionada pelo atrito. O GLP está na faixa dos “leves”, produtos de baixo peso molecular. Caracteriza-se por apresentar baixa viscosidade e densidade, além de uma perda de energia no escoamento reduzida, se comparado com o óleo diesel. Um ponto crítico do GLP, é a sua alta pressão de vapor, o que pode ocasionar a vaporização do produto no interior da linha, durante o escoamento. Todas as simulações foram executadas sob condições que evitassem esse tipo de ocorrência, assegurando sempre fase líquida no escoamento. A gasolina é o fluido de propriedades intermediárias aos dois anteriormente mencionados.

As propriedades dos fluidos são reunidas na tabela 4.1.

Tabela 4. 1 - Propriedades dos fluidos

	Diesel	Gasolina	GLP
Tipo de fluido	Liq	Liq	NGL
Módulo de Bulk ( $\text{kgf/cm}^2$ )	13700,00	8300,00	3800
Coefficiente de expansão térmica ( $1/^\circ\text{C}$ )	0,000216	0,000216	0,00216
Densidade de referência ( $\text{kg/m}^3$ )	832,00	720,00	535,00
Calor específico ( $\text{J/kg}\cdot\text{K}$ )	1842,20	2177,00	2298,55
Viscosidade 1 ( $1\cdot 10^{-2}\text{g/cm}\cdot\text{s}$ )	7,91	0,65	0,1682
Viscosidade 2 ( $1\cdot 10^{-2}\text{g/cm}\cdot\text{s}$ )	4,89	0,52	0,1507
Temperatura 1 ( $^\circ\text{C}$ )	20,00	20,00	20,00
Temperatura 2 ( $^\circ\text{C}$ )	37,8	37,80	37,80
Pressão de vapor 1 ( $\text{kgf/cm}^2$ relativo)	-	-	0,0012
Pressão de vapor 2 ( $\text{kgf/cm}^2$ relativo)	-	-	0,1045
Pressão de vapor 3 ( $\text{kgf/cm}^2$ relativo)	-	-	2,1919

## 4.2. DUTO

O duto estudado está representado por um diagrama esquemático na figura 4.1. A topologia do duto foi escolhida de forma a conter aspectos críticos de escoamento, como tubulação com altas elevações. Este duto reproduz, aproximadamente, o oleoduto nacional OBATI (Oleoduto Barueri - Utinga) que liga as cidades de Barueri a São Caetano do Sul, na região metropolitana de São Paulo.

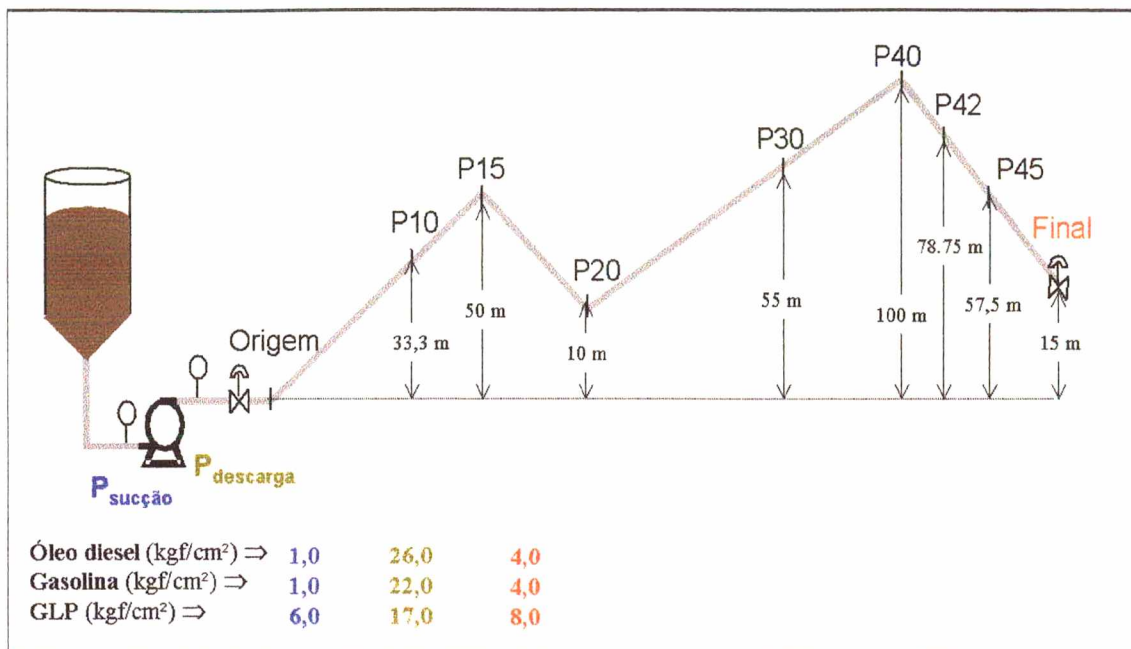


Figura 4. 1 - Esquema do duto de teste

Na tabela abaixo, são apresentadas as posições e altitudes dos pontos assinalados na figura 4.1. Nesses pontos foram inseridas as válvulas para a simulação de vazamento. Cada ponto apresentado representa um nó para fins de resolução do simulador.

Tabela 4. 2 Definição dos pontos de vazamento

Nó	Posição	Altura
Origem	0 km	0 m
P10	10 km	33,3 m
P15	15 km	50 m
P20	20 km	10 m
P30	30 km	55 m
P40	40 km	100 m
P42	42 km	78,75 m
P45	45 km	57,5 m
Final	50 km	15 m



O duto definido possui uma bomba (caracterizada no item 4.3) conectada à Origem. A tubulação possui as características a seguir:

**Tabela 4. 3 - Características físicas da tubulação**

Característica	Valor
Comprimento total (km)	50,00
Diâmetro interno (cm)	34,29
Espessura da parede (cm)	0,635
Rugosidade (cm)	0,004572

#### 4.3. ESTAÇÃO DE BOMBEAMENTO

No caso das simulações realizadas, a estação de bombeamento possui uma única bomba centrífuga de velocidade fixa, com único estágio. A seguir, é apresentada uma tabela com os valores da curva de bomba utilizada.

**Tabela 4. 4 - Curva da bomba**

Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)	Eficiência
0,00	500,00	0,50
400,00	400,00	0,80
550,00	300,00	0,75
650,00	200,00	0,70

O *setpoint* para as pressões de sucção e descarga da bomba foi escolhido de acordo com o fluido a ser bombeado. Na tabela abaixo, são apresentadas as pressões para cada fluido:

**Tabela 4. 5 – Set point da estação de bombeamento**

	Óleo diesel	Gasolina	GLP
P <sub>sucção</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	1,00	1,00	6,00
P <sub>descarga</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )	26,00	22,00	17,00

#### 4.4. CONDIÇÕES DE CONTORNO

Foi configurada uma válvula do tipo reguladora, a fim de simular os vazamentos na tubulação. Com o uso da válvula, é possível estipular a exata vazão vazada do duto, permitindo a padronização dos eventos de vazamento.

Em todos os pontos de entrada ou saída da tubulação, é necessário a definir uma condição de contorno para a resolução do modelo. Essas condições foram escolhidas com base em valores de operação real, fornecido por técnico da PETROBRAS/CENPES e são mostradas na tabela a seguir:

**Tabela 4. 5 - Condições de contorno**

Posição	Variável	Diesel (T = 25°C)	Gasolina (T = 20°C)	GLP (T = 15°C)
Final (50 km)	Pressão (kgf/cm <sup>2</sup> )	4,0	4,0	8,0
P*	Vazão (m <sup>3</sup> /h)	40,0	40,0	40,0
		20,0	20,0	20,0
		10,0	10,0	10,0
		4,0	4,0	4,0

P \* define a posição na tubulação onde está localizada a válvula, que simula o vazamento. As posições são 10 km, 15 km, 20 km, 30 km, 40 km, 42 km, 45 km.

#### 4.5. DEFINIÇÕES DE RESOLUÇÃO

Para todas as simulações foi utilizado o mesmo tamanho de discretização em todo o comprimento do duto. Os *knots* foram definidos a cada 200 m. O passo de cálculo utilizado foi de 8 segundos. Essas definições foram escolhidas por permitirem aceleração dos cálculos da simulação e não ter perda relevante na precisão.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos nas simulações realizadas. Serão mostrados gráficos e comentários do comportamento da pressão em relação ao tempo, em várias posições do duto, durante um evento de vazamento simulado. O comportamento mostrado a seguir foi obtido das simulações de escoamento com os três fluidos caracterizados anteriormente, óleo diesel, gasolina e GLP.

### **5.1 APRESENTAÇÃO**

Os gráficos apresentados abordam o comportamento da pressão em um duto pré-definido, com escoamento de um único fluido de cada vez, anteriormente caracterizados no item 4.1. Os gráficos obtidos obedecem a um seqüenciamento por ordem de proximidade do vazamento simulado em relação ao início do duto. Assim, a ordem é, primeiramente, o ponto de menor afastamento da origem, que é a posição em 10 km. Na seqüência, aparecem os gráficos das posições seguintes 15, 20, 30, 40, 42, 45 km. Esta ordem será utilizada na apresentação dos resultados dos três fluidos.

Cada gráfico apresenta oito curvas, das quais quatro são relativas ao comportamento da pressão sob quatro diferentes vazões vazadas. As outras quatro curvas que aparecem praticamente superpostas, representam a aproximação numérica realizada. O eixo de ordenadas dos gráficos representa a mudança de pressão que ocorre no momento do vazamento. Essa queda é calculada como sendo a diferença entre o valor de pressão em regime permanente do duto em operação normal e as pressões a partir do momento em que é observada a mudança na pressão devido a vazamento, medido em  $\text{kgf/cm}^2$ . O eixo das abcissas é o tempo contado a partir do início do efeito do vazamento sobre a pressão, em segundos.

Um modelo dinâmico linear de segunda ordem foi utilizado para aproximar o comportamento do processo (variação de pressão na presença de vazamento). A



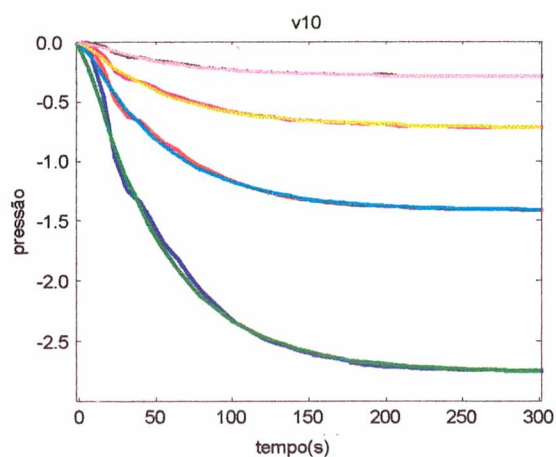
resposta deste a uma perturbação degrau, a abertura do vazamento de forma instantânea, está representada na equação:

$$pressão = K_e \left( 1 - \frac{\tau_1 e^{-t/\tau_1} - \tau_2 e^{-t/\tau_2}}{\tau_1 - \tau_2} \right) \quad (5.1)$$

O ajuste dos parâmetros do modelo foi realizado a partir de dados simulados, sendo apresentados, a seguir, os gráficos com as curvas de dados simulados de resposta à perturbação (vazamento) e do modelo identificado.

## 5.2 RESULTADOS PARA ÓLEO DIESEL

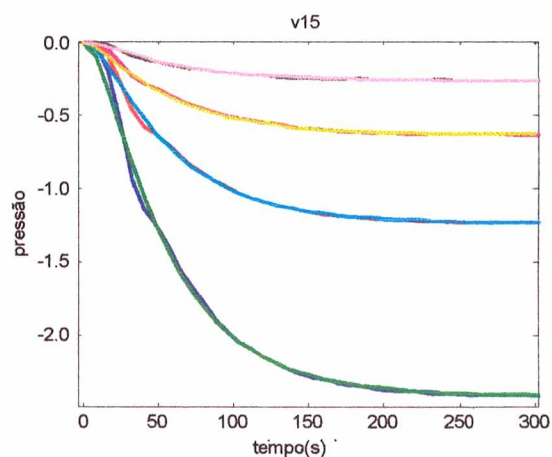
A seguir, serão apresentados os gráficos do comportamento da pressão quando o fluido em escoamento é óleo diesel.



**Figura 5.1 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 10 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 5,95 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,43 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,36 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,05 \times 10^{-5}$



**Figura 5.2 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 15 km**

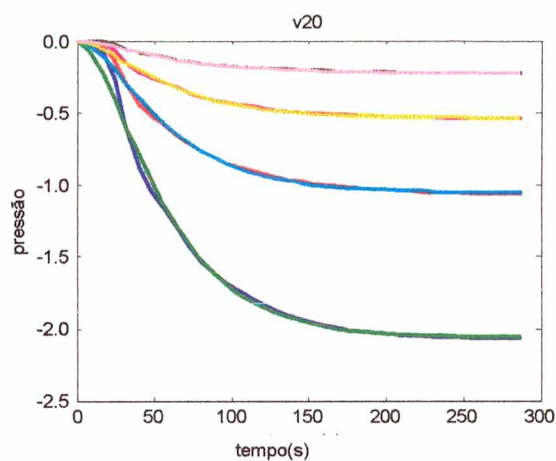
Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 2,65 \times 10^{-4}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,69 \times 10^{-4}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,17 \times 10^{-4}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,03 \times 10^{-4}$

Na figura 5.1, pode-se observar que uma maior queda de pressão, está diretamente relacionado com a vazão vazada. Com o aumento da vazão de fluido que

escapa da tubulação, constata-se um aumento da diferença da pressão entre as duas extremidades da tubulação em relação ao regime permanente, já que a curva de pressão referente a  $4 \text{ m}^3/\text{h}$  de vazamento, estabiliza em um valor menor em módulo do que a de  $10 \text{ m}^3/\text{h}$ , e assim sucessivamente.

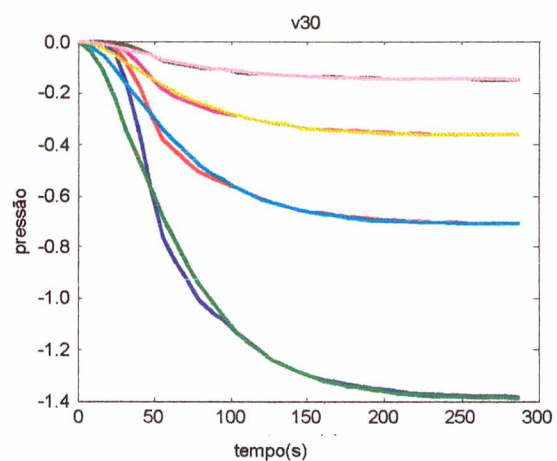
No gráfico ao lado, figura 5.2, verifica-se o mesmo comportamento descrito anteriormente, ainda que a posição de vazamento do duto seja, neste caso, em um ponto de elevação maior e a maior distância da origem.



**Figura 5. 3 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 20 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

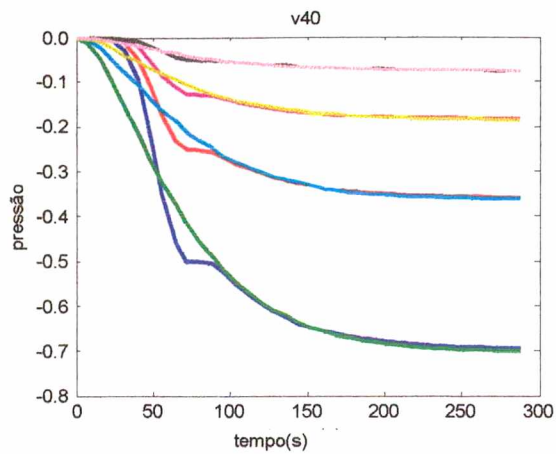
- $40 \text{ m}^3/\text{h} = 1,23 \times 10^{-4}$
- $20 \text{ m}^3/\text{h} = 0,31 \times 10^{-4}$
- $10 \text{ m}^3/\text{h} = 0,08 \times 10^{-4}$
- $4 \text{ m}^3/\text{h} = 0,01 \times 10^{-4}$



**Figura 5. 4 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 30 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

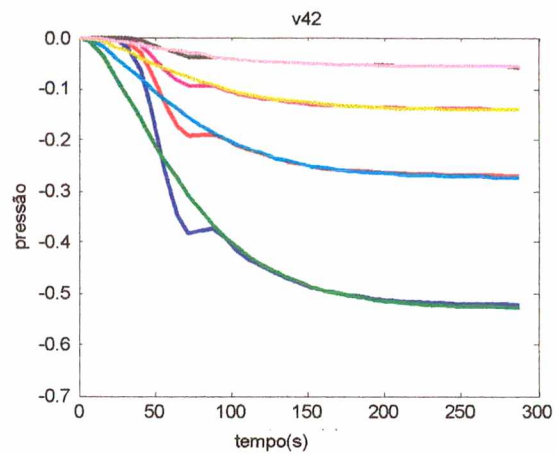
- $40 \text{ m}^3/\text{h} = 1,59 \times 10^{-4}$
- $20 \text{ m}^3/\text{h} = 0,40 \times 10^{-4}$
- $10 \text{ m}^3/\text{h} = 0,10 \times 10^{-4}$
- $4 \text{ m}^3/\text{h} = 0,01 \times 10^{-4}$



**Figura 5. 5 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 40 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 4,50 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,15 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,29 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,03 \times 10^{-5}$

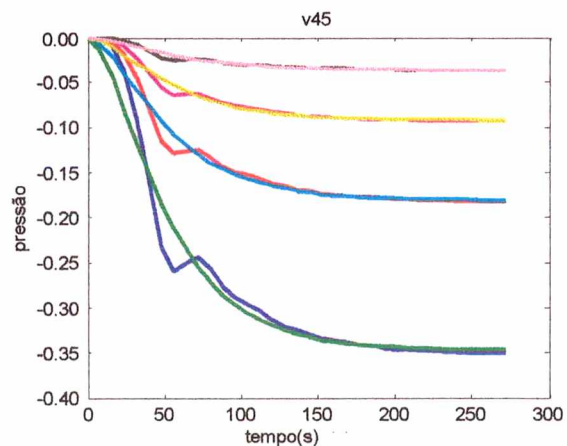


**Figura 5. 6 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 42 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 3,60 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,90 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,21 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,02 \times 10^{-5}$

Como pode ser observado, confrontando os quatro gráficos já mostrados, existe grande semelhança visual no comportamento das curvas de cada quantidade vazada, com a sua correspondente nas diferentes posições, contudo, nas figuras 5.3 e 5.4, torna-se mais aparente um efeito que difere da tendência predominantemente exponencial das curvas. Isso se verifica, especialmente para as maiores vazões vazadas.



**Figura 5. 7 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 45 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 7,75 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,98 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,46 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,06 \times 10^{-5}$

Com as figuras 5.5, 5.6 e 5.7, confirma-se a oscilação nas curvas de dados simulados, observada anteriormente. Além disso, nota-se o aumento do efeito oscilatório, com o distanciamento da origem da tubulação, onde se obtêm os valores de pressão. Apesar de identificado, não foi possível determinar a origem deste comportamento, podendo ser de origem física ou decorrente da solução numérica.

Ainda que a onda observada seja de origem física, a sua ordem de grandeza é tão reduzida, que seria possível até mesmo ignorá-la na análise da perda de pressão por vazamento. Adicionalmente, na prática, é muito provável que essas ondas, ainda que sendo de origem física, misturem-se ao ruído ou até mesmo a imprecisão dos sensores.

Para validar estes resultados, faz-se necessário realizar simulações em outros *softwares* de simulação de escoamento e, adicionalmente comparar as simulações com dados empíricos.

## **5.2 RESULTADOS PARA A GASOLINA**

As observações qualitativas efetuadas para o óleo diesel, podem ser, também reconhecidas no caso da simulação de escoamento utilizando gasolina. A pressão tem a mesma relação com a quantidade de fluido que escapa da tubulação, que a já observada anteriormente. É visível nos gráficos que o aumento da vazão vazada tem como consequência uma maior queda de pressão. Fato este, que pode ser verificado em todas as posições da tubulação onde foram simulados vazamentos. Existe uma seqüência na ordenação do comportamento da pressão em relação a quantidade que vaza da tubulação. Este ordenamento é um crescente vazamento para uma crescente queda de pressão.



Com as figuras 5.5, 5.6 e 5.7, confirma-se a oscilação nas curvas de dados simulados, observada anteriormente. Além disso, nota-se o aumento do efeito oscilatório, com o distanciamento da origem da tubulação, onde se obtêm os valores de pressão. Apesar de identificado, não foi possível determinar a origem deste comportamento, podendo ser de origem física ou decorrente da solução numérica.

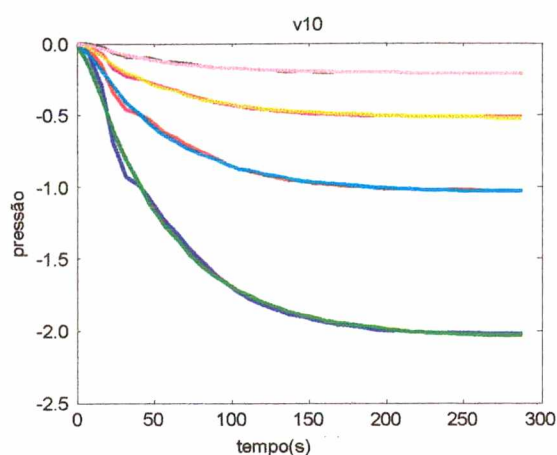
Ainda que a onda observada seja de origem física, a sua ordem de grandeza é tão reduzida, que seria possível até mesmo ignorá-la na análise da perda de pressão por vazamento. Adicionalmente, na prática, é muito provável que essas ondas, ainda que sendo de origem física, misturem-se ao ruído ou até mesmo a imprecisão dos sensores.

Para validar estes resultados, faz-se necessário realizar simulações em outros *softwares* de simulação de escoamento e, adicionalmente comparar as simulações com dados empíricos.

## **5.2 RESULTADOS PARA A GASOLINA**

As observações qualitativas efetuadas para o óleo diesel, podem ser, também reconhecidas no caso da simulação de escoamento utilizando gasolina. A pressão tem a mesma relação com a quantidade de fluido que escapa da tubulação, que a já observada anteriormente. É visível nos gráficos que o aumento da vazão vazada tem como consequência uma maior queda de pressão. Fato este, que pode ser verificado em todas as posições da tubulação onde foram simulados vazamentos. Existe uma seqüência na ordenação do comportamento da pressão em relação a quantidade que vaza da tubulação. Este ordenamento é um crescente vazamento para uma crescente queda de pressão.

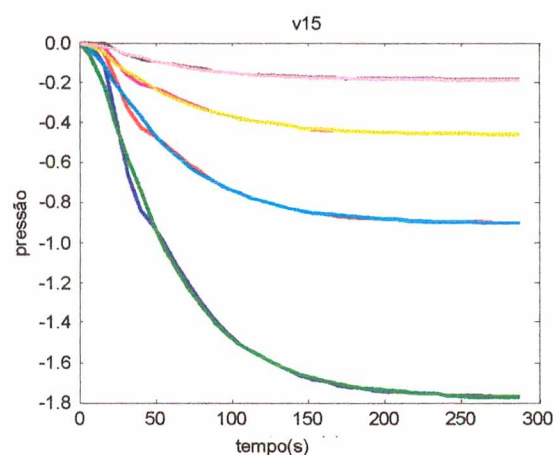




**Figura 5. 8 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 10 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 7,73 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,84 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,45 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,07 \times 10^{-5}$

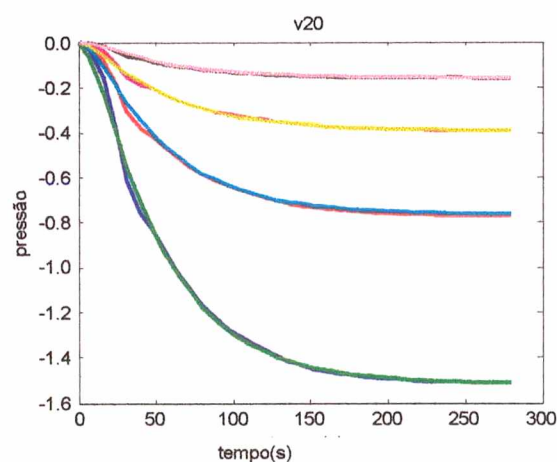


**Figura 5. 9 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 15 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 2,87 \times 10^{-4}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,73 \times 10^{-4}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,18 \times 10^{-4}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,03 \times 10^{-4}$

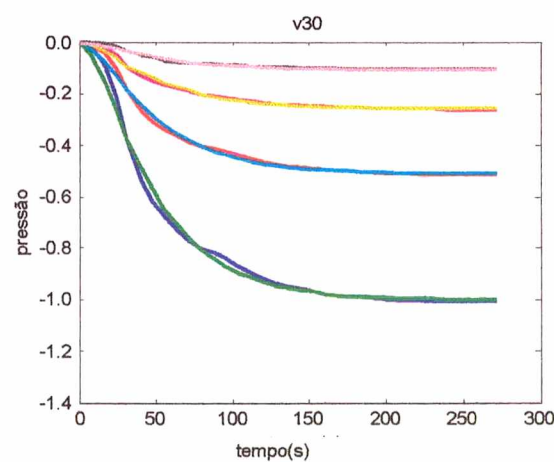
Como pode ser observado no eixo da pressão, existe uma diferenciação quantitativa na queda de pressão, em relação aos dois gráficos. No caso da saída de fluido na posição 10 km há uma queda de pressão maior do quando a saída de fluido se dá na posição 15 km.



**Figura 5. 10 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 20 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 1,15 \times 10^{-4}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,29 \times 10^{-4}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,07 \times 10^{-4}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,01 \times 10^{-4}$

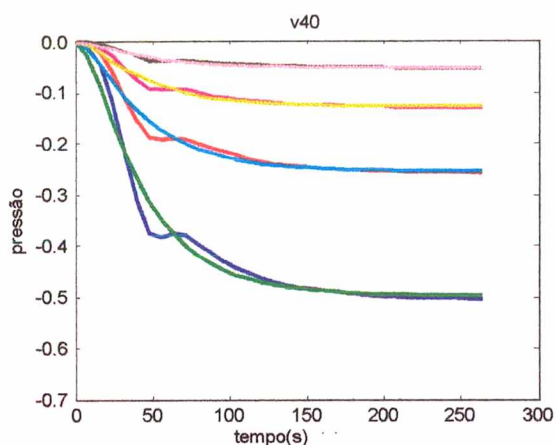


**Figura 5. 11 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 30 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 1,68 \times 10^{-4}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,41 \times 10^{-4}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,10 \times 10^{-4}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,01 \times 10^{-4}$

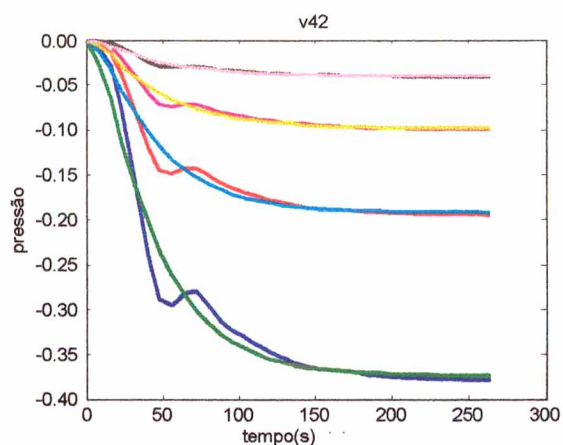
Os gráficos das posições 20 e 30 km mostram a mesma tendência dos anteriores, a pressão decaindo com a liberação de fluido. A diferença entre eles é o valor total do decaimento, que é maior quando no caso da figura 5.10 se comparado com a figura 5.11.



**Figura 5. 12 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 40 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

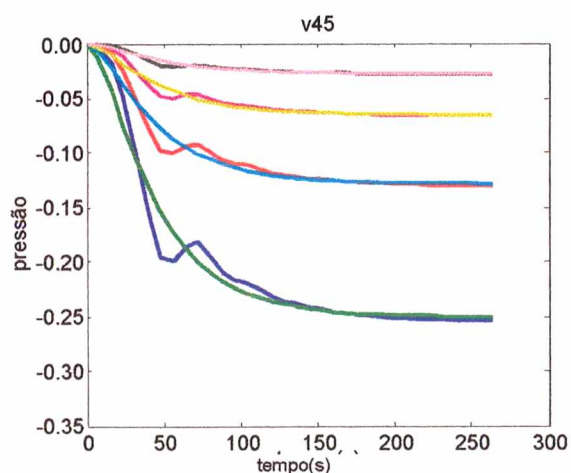
- $40\text{m}^3/\text{h} = 6,18 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,52 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,37 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,05 \times 10^{-5}$



**Figura 5. 13 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 42 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 4,71 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,15 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,28 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,04 \times 10^{-5}$



**Figura 5. 14 - Queda de pressão devido a na posição 45 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

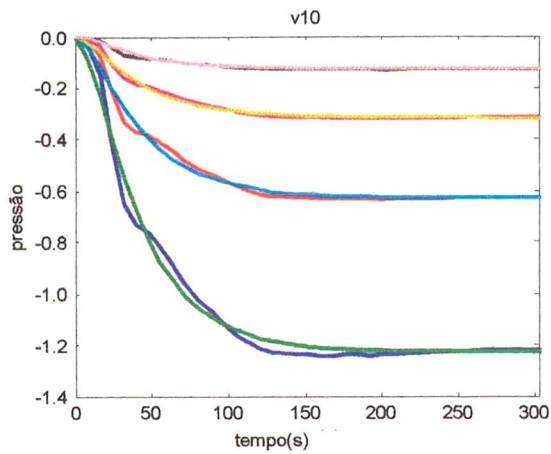
- $40\text{m}^3/\text{h} = 2,44 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,60 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,15 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,02 \times 10^{-5}$

Observando o conjunto completo dos sete gráficos, nota-se que todos apresentam o mesmo comportamento, aproximando-se muito de uma curva exponencial. Pode ser verificado nos eixos de cada gráfico, que a pressão revela uma certa proporcionalidade com a posição onde foi simulado o vazamento, ou seja, a medida que se vai da origem da tubulação na direção do escoamento até a extremidade final, a queda de pressão é menor. Com isso, conclui-se que a queda de pressão vai diminuindo com o afastamento da origem, mais especificamente, do ponto de media da de pressão. Essa é uma característica que poderia ser utilizada para localização de vazamentos.

As oscilações das curvas com dados simulados, no caso da gasolina, são aparentemente as mesmas que ocorrem com o diesel, tendo, provavelmente, as mesmas razões para esse comportamento.

### **5.3 RESULTADOS PARA GLP**

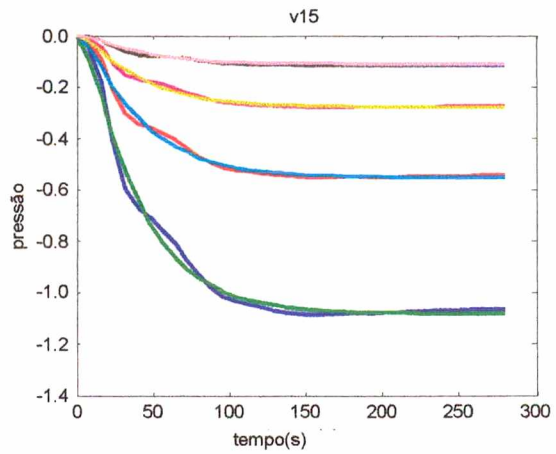
Logo a seguir será apresentado o conjunto de gráficos do mesmo tipo dos apresentados anteriormente para óleo diesel. Mais uma vez, pode-se proceder a análise e chega-se às conclusões anteriores. Ainda que os três fluidos tenham propriedades físicas diferentes, como a viscosidade e densidade, o seu comportamento foi muito semelhante aos anteriores.



**Figura 5.15 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 10 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 4,18 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,34 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,39 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,08 \times 10^{-5}$

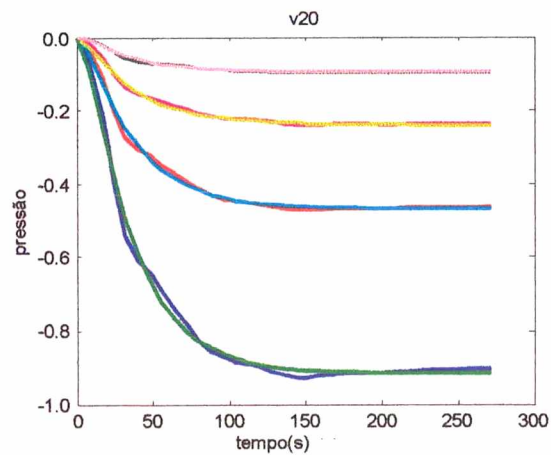


**Figura 5.16 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 15 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 3,75 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,08 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,31 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,06 \times 10^{-5}$

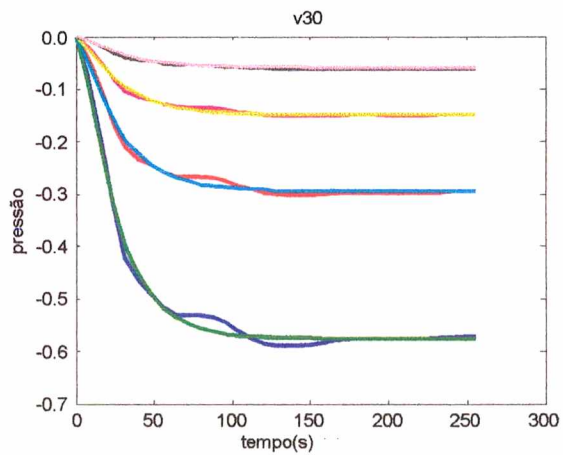
Comparando as figuras 5.15 e 5.16, com as figuras das respectivas posições para os outros dois fluidos, percebe-se apenas diferença no valor da mudança de pressão total, que é menor, quanto menos viscoso é o fluido.



**Figura 5.17 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 20 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 1,31 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,38 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,11 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,02 \times 10^{-5}$



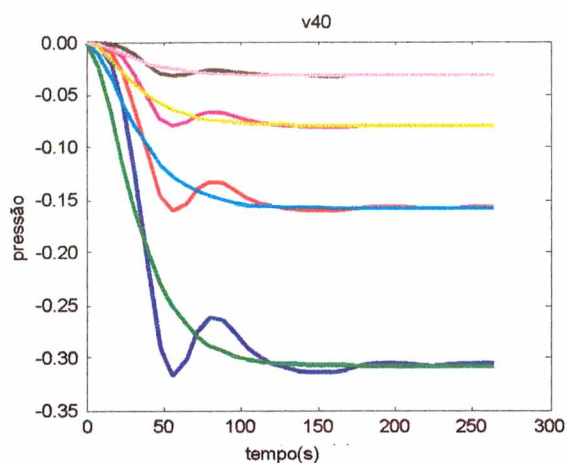
**Figura 5.18 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 30 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 2,42 \times 10^{-6}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,57 \times 10^{-6}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,12 \times 10^{-6}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,01 \times 10^{-6}$



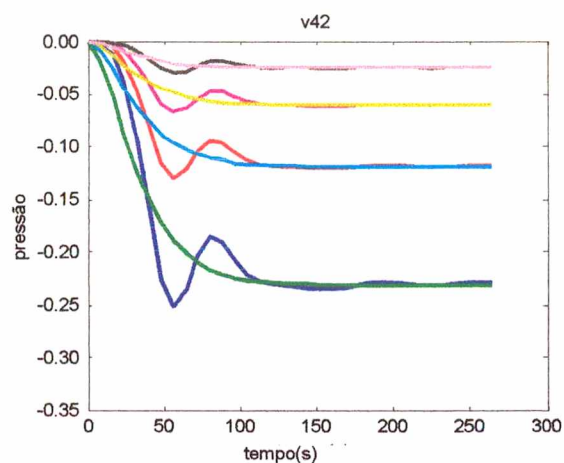
Na sequência, as figuras para as posições restantes confirmam a diferença entre as mudanças na pressão, no sentido de serem menores quanto menos viscoso é o produto. Esse fato está diretamente relacionado com a perda de carga devido ao atrito.



**Figura 5. 19 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 40 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

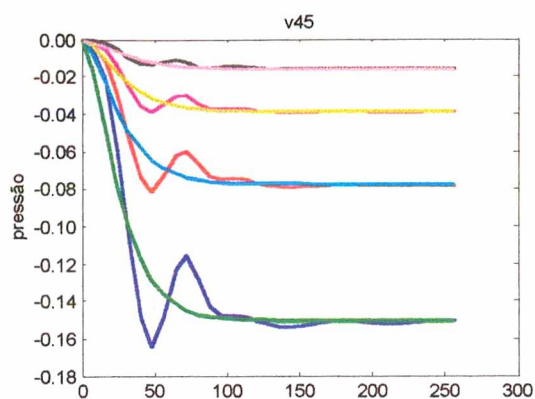
- $40\text{m}^3/\text{h} = 1,54 \times 10^{-4}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,38 \times 10^{-4}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,09 \times 10^{-4}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,02 \times 10^{-4}$



**Figura 5.20 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 42 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 1,07 \times 10^{-4}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 0,28 \times 10^{-4}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,08 \times 10^{-4}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,02 \times 10^{-4}$



**Figura 5. 21 - Queda de pressão devido a vazamento na posição 45 km**

Erro médio quadrático para as diferentes vazões:

- $40\text{m}^3/\text{h} = 4,59 \times 10^{-5}$
- $20\text{m}^3/\text{h} = 1,07 \times 10^{-5}$
- $10\text{m}^3/\text{h} = 0,22 \times 10^{-5}$
- $4\text{m}^3/\text{h} = 0,02 \times 10^{-5}$

## 5.5 ANÁLISES DIVERSAS

O gráfico a seguir, ilustra o comportamento, para o óleo diesel, da diferença de pressão calculada entre o valor de pressão em regime permanente do duto em escoamento normal antes do vazamento, e a pressão estabilizada depois do vazamento.

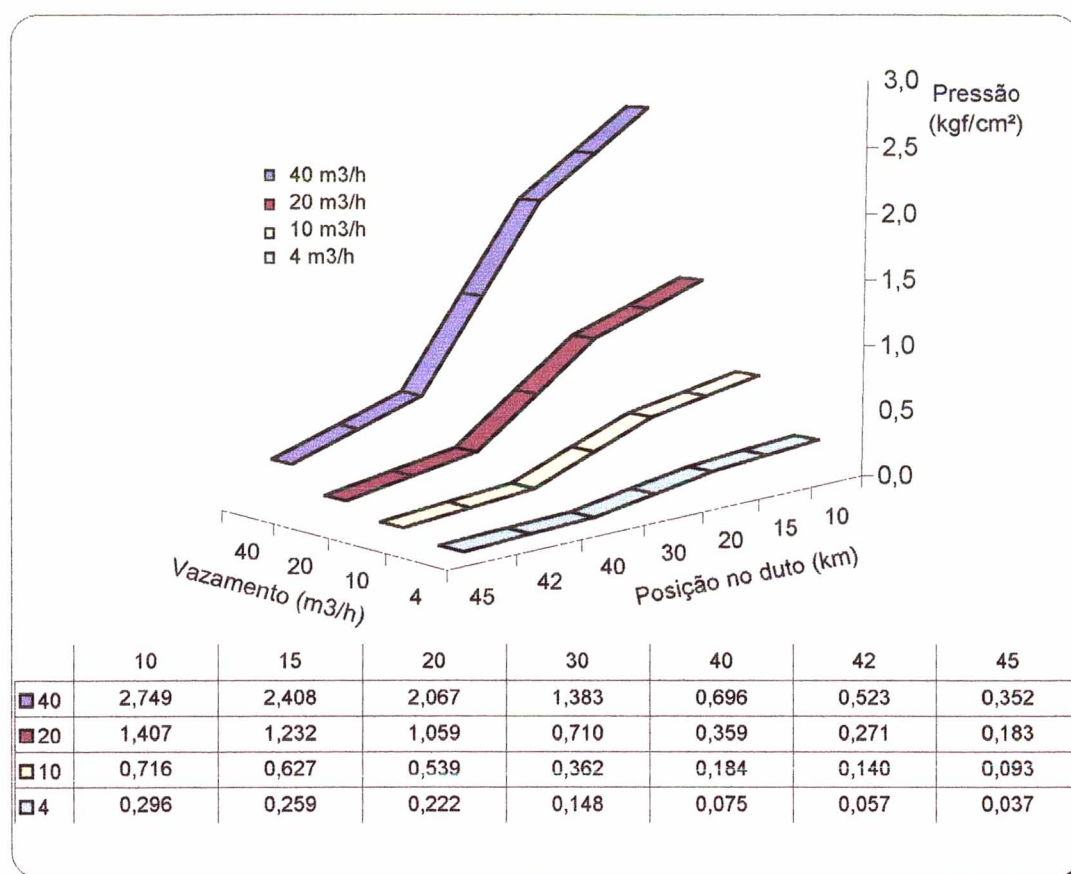
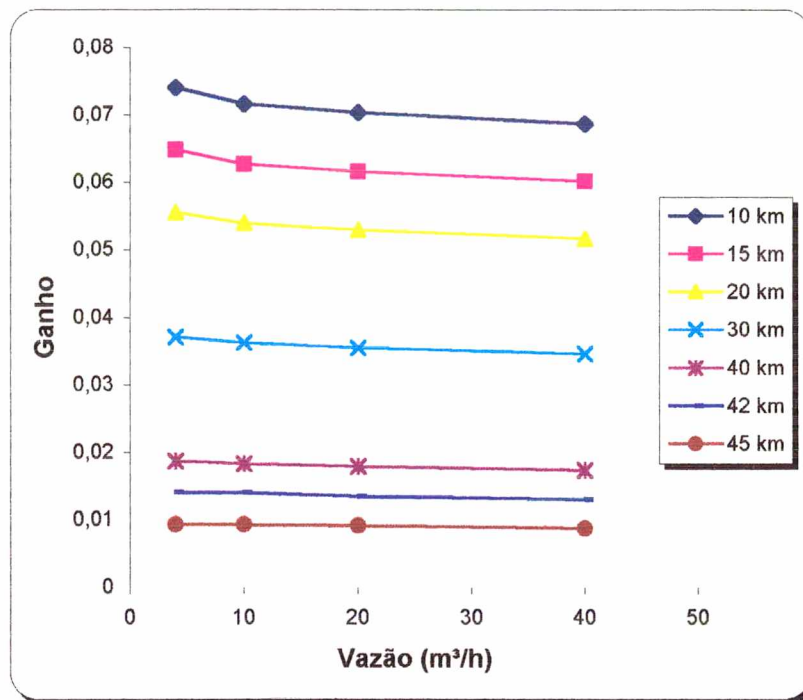


Figura 5. 22 - Tendência da queda de pressão durante vazamento – fluido: óleo diesel

Com a figura 5.22, tem-se uma melhor visualização do comportamento global da pressão na origem do duto, quando são simulados os vazamentos, nas várias posições. Nesta figura, observa-se claramente que a pressão apresenta valor numérico diferente para cada vazão e cada posição, no entanto, o formato das curvas é semelhante. A tabela de dados mostrada abaixo do gráfico, demonstra numericamente o comportamento da pressão com as vazões vazadas e com o distanciamento da origem.



**Figura 5.23 - Comportamento da vazão em relação ao ganho estático para o óleo diesel**

A figura 5.23 mostra que o ganho se comporta de forma linear quando se trata de vazamentos nas posições mais distantes do ponto de monitoramento da pressão, que são 30, 40, 42 e 45 km. Mais próximo da origem do duto, nos pontos 10, 15, 20, aparece uma pequena não linearidade para baixa vazão vazada.

A seguir, apresenta-se a curva de pressão semelhante à figura 5.22 anteriormente mostrada, no entanto, para gasolina.



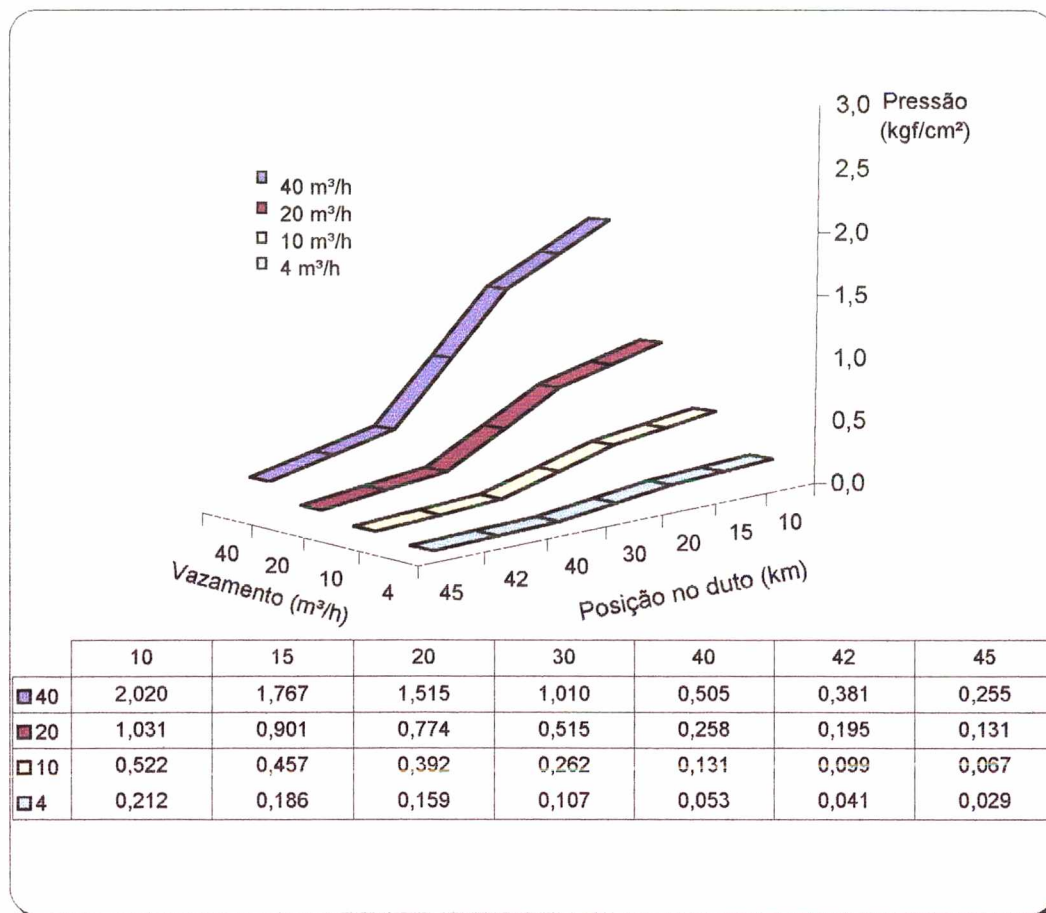


Figura 5. 24 - Tendência da queda de pressão durante vazamento – fluido: gasolina

Na figura 5.24, observa-se a repetição do comportamento apresentado para o óleo diesel nas mesmas condições e posições de vazamento. A tabela de dados mostrada abaixo do gráfico, demonstra numericamente o comportamento da pressão com as vazões vazadas e com o distanciamento da origem.

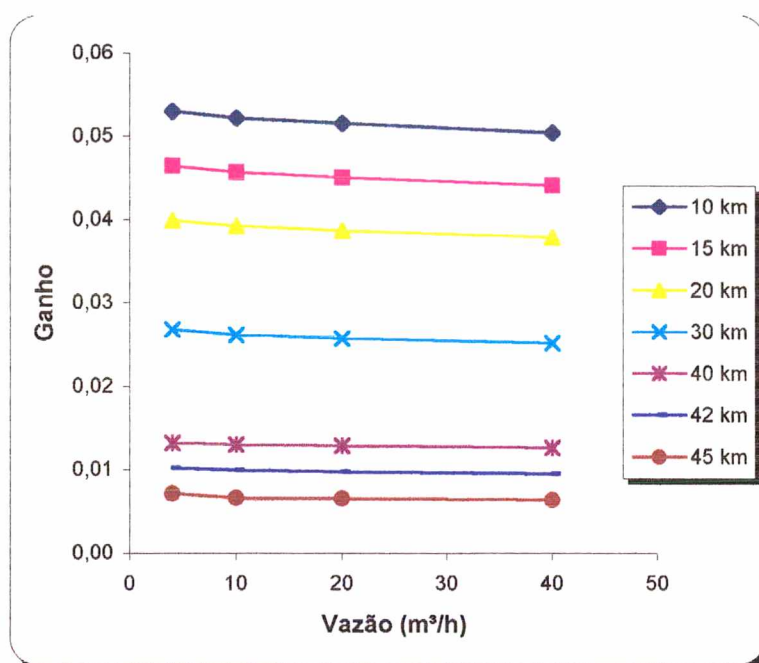


Figura 5. 25 - Comportamento da vazão em relação ao ganho estático para a gasolina

Para a gasolina, figura 5.25, o comportamento do ganho segue a mesma tendência do óleo diesel, sendo que neste caso, observa-se mais fortemente o comportamento linear do ganho.

A seguir, apresenta-se a figura 5.26, que é o comportamento da pressão em relação a posição e vazão vazada para o GLP, onde se percebe que apresenta o mesmo comportamento das demais, só se diferenciando pelo valor da queda de pressão.

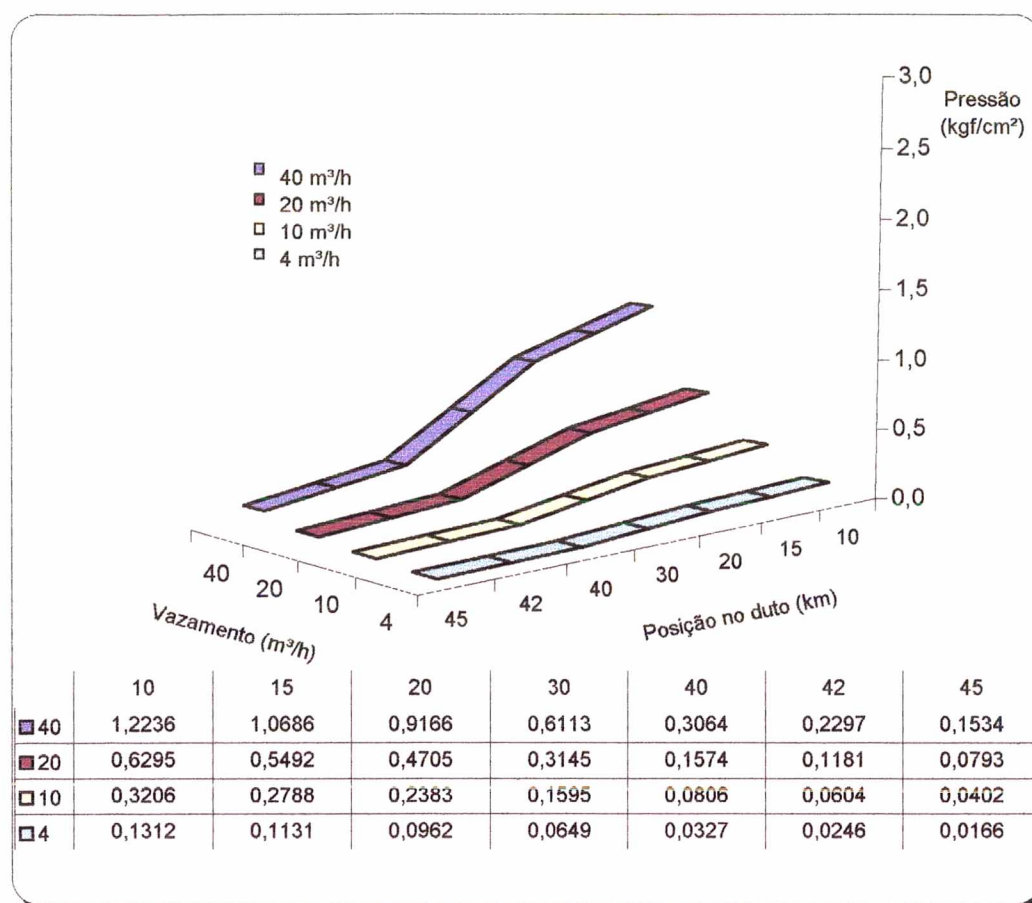


Figura 5. 26 - Tendência da queda de pressão durante vazamento – fluido: GLP

As curvas de ganho apresentadas para o GLP, figura 5.27, demonstram linearidade apenas quando um vazamento é simulado na posição 45 km, nas demais, a não linearidade vai aumentando com a proximidade da origem.

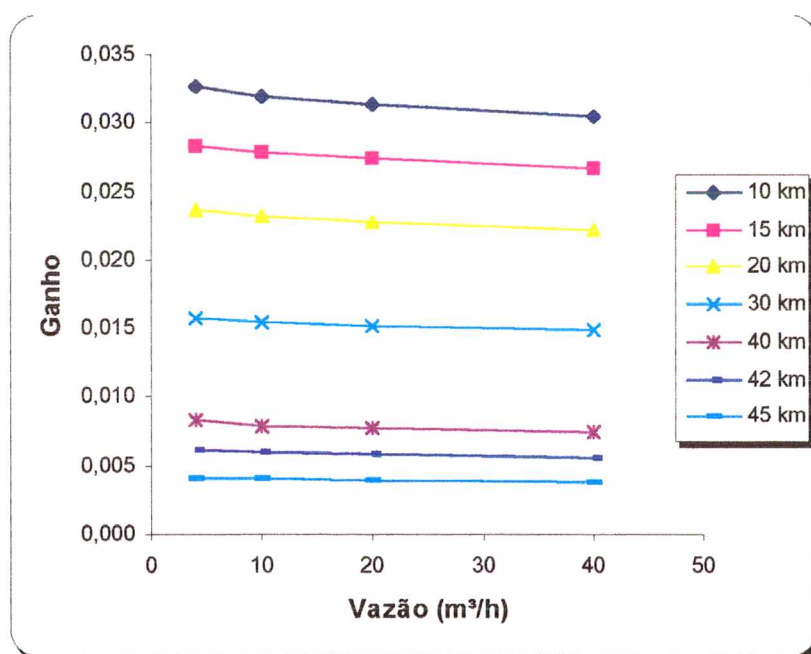
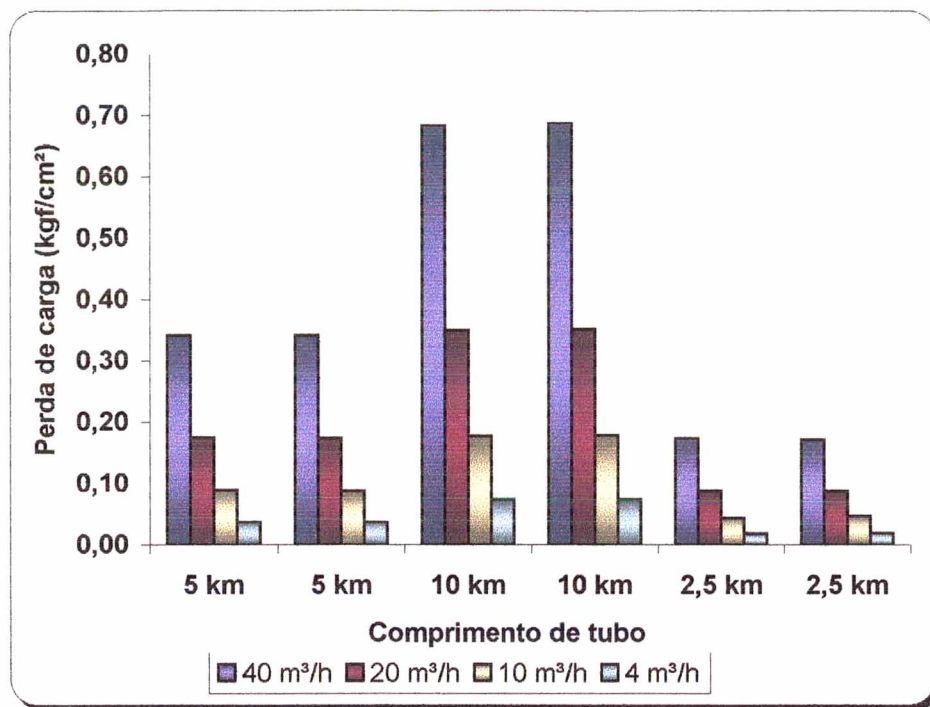


Figura 5. 27 - Comportamento da vazão em relação ao ganho estático para o GLP

Separando o duto em seis trechos menores de tubulação, sejam eles:

- o trecho compreendido entre P10 e P15, com 5 km de extensão,
- o trecho compreendido entre P15 e P20, com 5 km de extensão,
- o trecho compreendido entre P20 e P30, com 10 km de extensão,
- o trecho compreendido entre P30 e P40, com 10 km de extensão,
- o trecho compreendido entre P40 e P42,5, com 2,5 km de extensão,
- o trecho compreendido entre P42,5 e P45 com 2,5 km de extensão,

e calculando a queda de pressão total que ocorre com a abertura da válvula de vazamento, pode-se observar, como mostra o gráfico a seguir, figura 5.28, que existe proporcionalidade no decaimento da pressão com relação ao tamanho de duto percorrido pelo fluido.

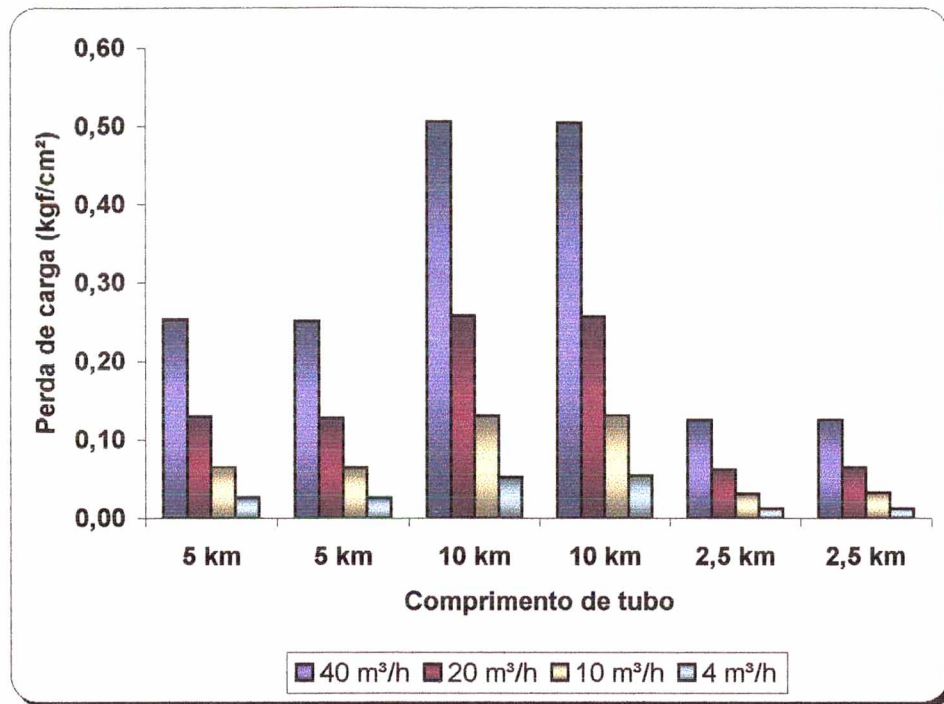


**Figura 5. 28** Perda de pressão em trechos de duto com vazamento na posição 10 km, fluido: óleo diesel

Observa-se que para iguais tamanhos de duto, há uma proporcionalidade no valor de queda de pressão resultante para trechos de mesmo tamanho. Essa repetibilidade é esperada, já que as outras variáveis que influenciam na perda de carga são constantes, e sabe-se da teoria que a perda de carga é diretamente proporcional ao comprimento do duto, STREETER (1977).

Essa análise pode ser vista com maior facilidade analisando a equação 2.4 de Darcy-Weisbach apresentada no capítulo Revisão Bibliográfica. Por exemplo, a perda de carga do duto de 10 km, é o dobro do valor dos de 5 km e, quatro vezes o valor dos de 2,5 km.





**Figura 5. 29 - Perda de pressão em trechos de duto com vazamento na posição 10 km, fluido: gasolina**

Essa análise pode ser utilizada como uma forma de verificar os resultados das simulações, já que a semelhança nas perdas de carga por trechos de duto é um resultado esperado. Também é importante, para a compreensão das curvas do comportamento da pressão quando de um vazamento. Todas apresentaram o mesmo aspecto, ainda que estivessem em elevações diferentes, como pode ser verificado nas figuras 5.28, 5.29, 5.30.

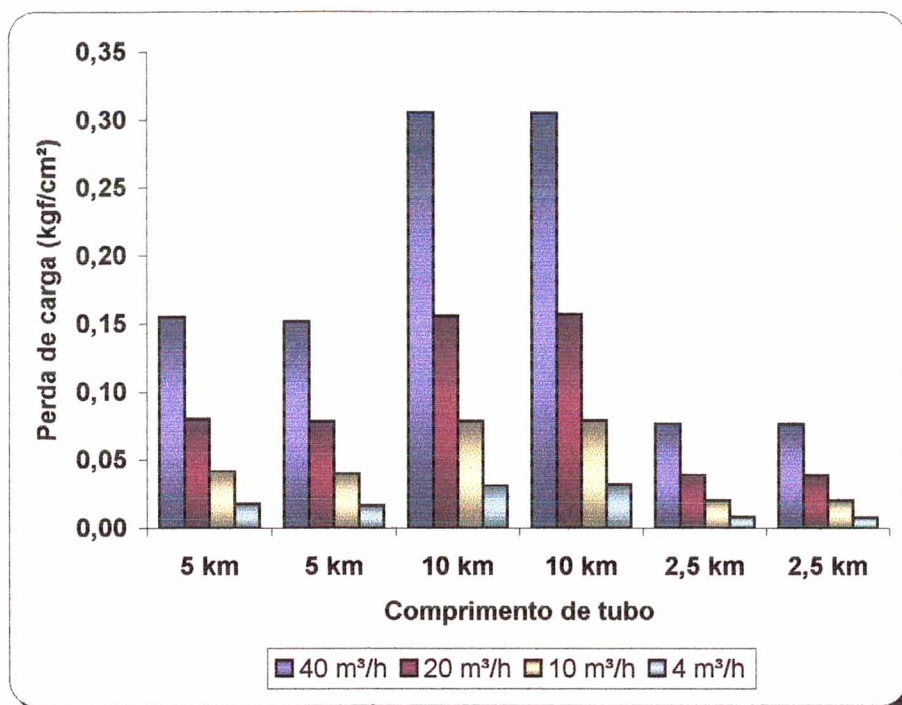


Figura 5.30 - Perda de pressão em trechos de duto com vazamento na posição 10 km, fluido: GLP

Com o objetivo de caracterizar, quantitativamente, o comportamento da pressão do duto de teste, sujeito a um vazamento, calculou-se as constantes de tempo para cada fluido nas várias posições. As figuras 5.31 e 5.32 apresentam essas constantes em relação a densidade do fluido quando o vazamento foi simulado na posição 10 km.

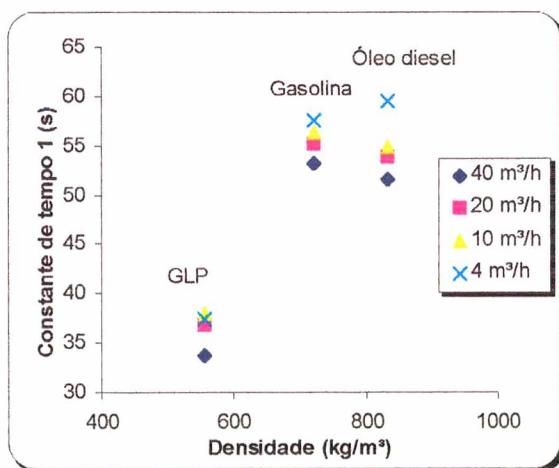


Figura 5.31 - Relação entre o tipo de fluido com a constante de tempo 1 durante vazamentos na posição 10 km

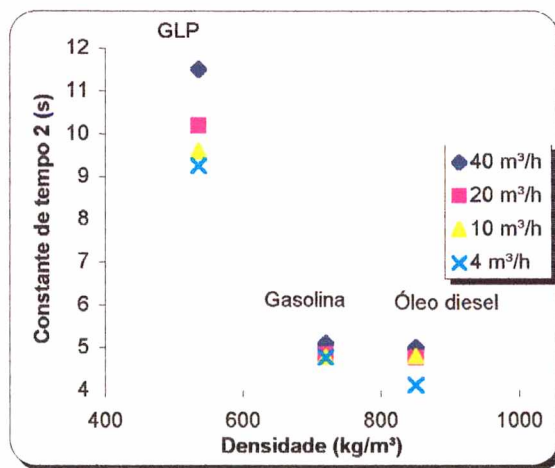


Figura 5.32 - Relação entre o tipo de fluido com a constante de tempo 2 durante vazamentos na posição 10 km

As constantes 1 e 2 mostram comportamento aparentemente parabólico.

O comportamento da constante de tempo para os fluidos em relação as suas viscosidades também não se apresenta de forma linear, com pode ser visto nas figuras 5.33 e 5.34.

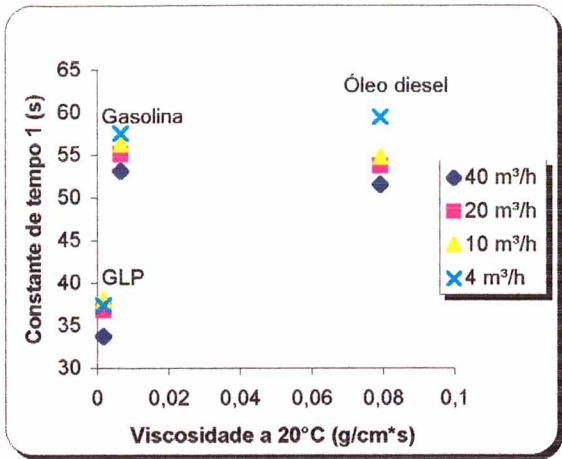


Figura 5. 33 - Relação entre a viscosidade de fluido com a constante de tempo 1 durante vazamentos na posição 10 km

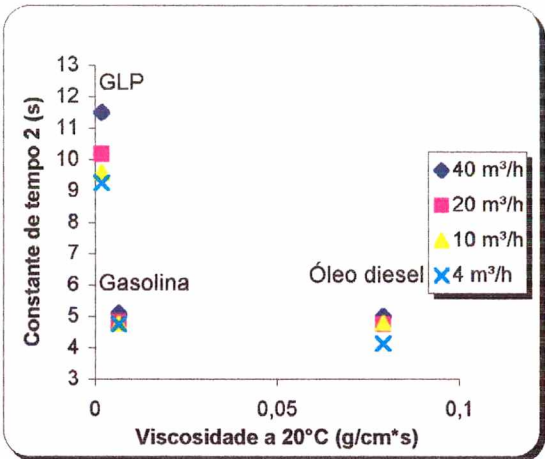


Figura 5. 34 - Relação entre a viscosidade de fluido com a constante de tempo 2 durante vazamentos na posição 10 km

Na tabela a seguir, estão as médias das constantes de tempo obtidas para todas as posições de vazamentos e vazões vazadas, bem como os máximos e mínimos valores encontrados dessas constantes.

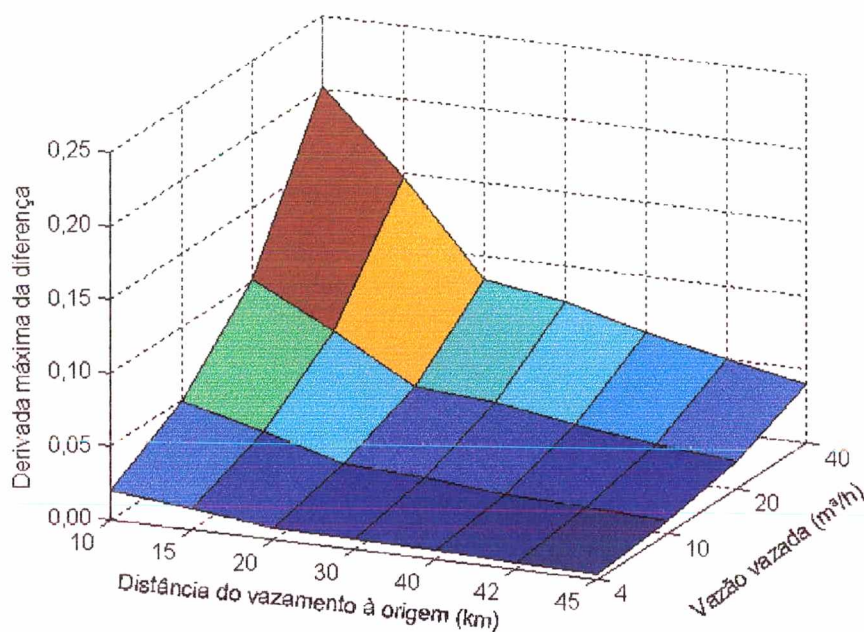
Tabela 5. 1 - Constantes de tempo

	Média		Máximo		Mínimo	
	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)	$\tau_1$ (s)	$\tau_2$ (s)
Óleo diesel	47	10	60	20	38	4
Gasolina	45	11	58	13	36	5
GLP	26	12	37	23	17	4

Devido à característica não linear do processo as curvas do modelo identificado e dos dados reais apresentam ligeiras diferenças. Subtraindo uma curva da outra, observou-se que a derivada máxima da resultante mudava progressivamente em função da vazão vazada e da localização do vazamento.

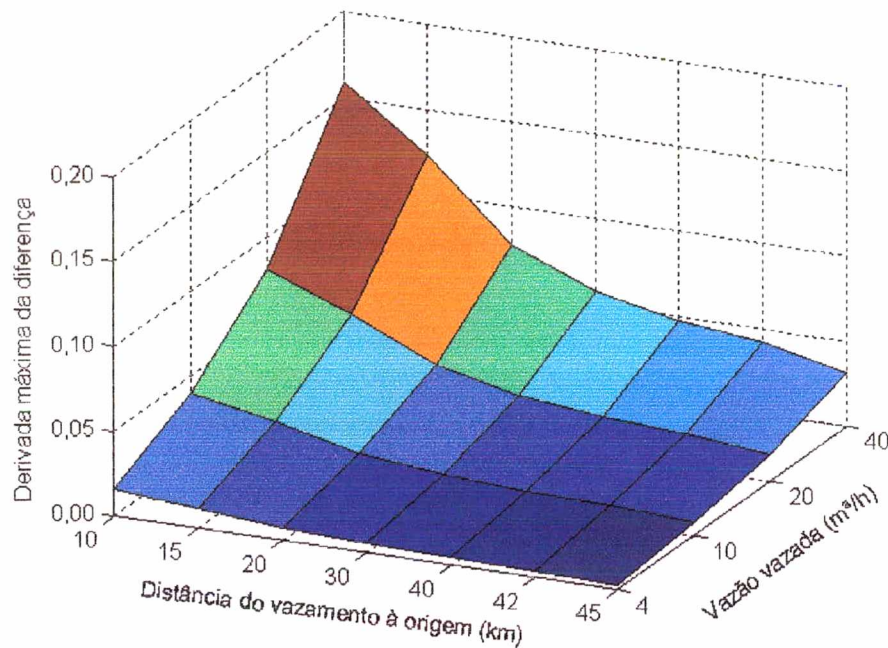


As superfícies, 5.35, 5.36, 5.37, apresentam estes resultados, sendo representadas, nos eixos "x" e "y", vazão vazada e localização do vazamento, e no eixo "z" o valor da máxima derivada da diferença entre os dados de simulação e os obtidos a partir do modelo aproximado. A seguir são apresentadas as superfícies para os três fluidos analisados neste trabalho.



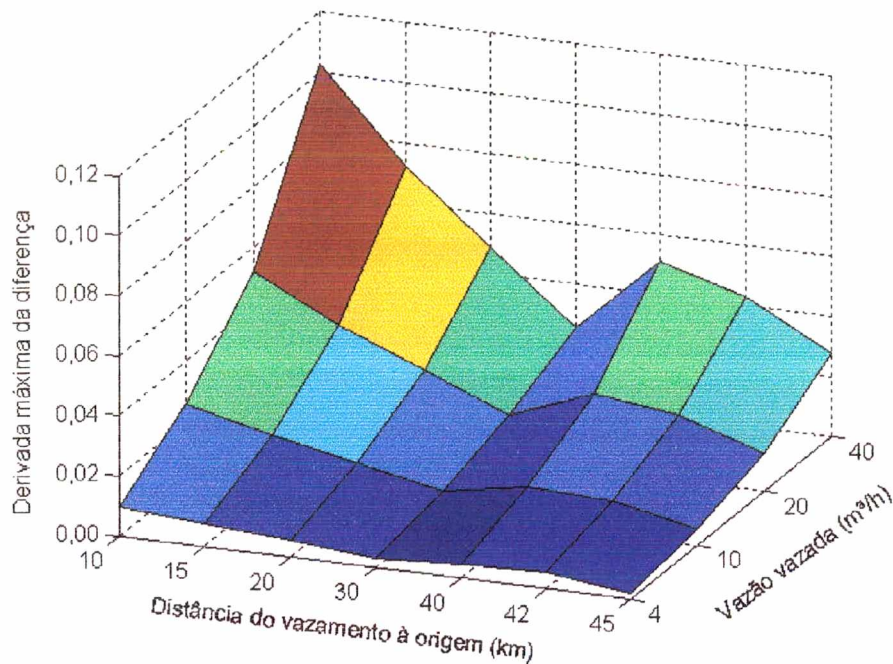
**Figura 5. 35 - Superfície para óleo diesel**

A figura 5.36 apresenta a superfície para a gasolina, como pode ser visto, a superfície para a gasolina é bastante semelhante a do óleo diesel.



**Figura 5. 36 - Superfície para a gasolina**

A figura 5.37, apresenta a superfície para o GLP, nela pode-se perceber a semelhança com as superfícies apresentadas nas figuras 5.36 e 5.35, desde a posição 10 km até 30 km. A partir de 40 km existe uma diferença do comportamento em relação aos anteriormente mostrados nas figuras 5.36 e 5.37, sendo que esta mudança poderia ser atribuída a erros numéricos, já que a partir dessa posição, as perdas na pressão vão se tornando cada vez menores, mais sensíveis a flutuações numéricas.



**Figura 5. 37 - Superfície para GLP**

Os resultados obtidos deveriam ser confirmados através de simulações com outros *softwares* e com dados de campo, devido a possibilidade de que sejam exclusivamente flutuações numéricas. Não sendo, esta característica poderia ser utilizada para realizar detecção de vazamento.

Diferenças na densidade entre os fluidos não interferem nos resultados de perda de pressão qualitativamente, apenas quantitativamente. Na figura 5.38, onde é apresentado o comportamento da queda de pressão durante um vazamento simulado na posição 10 km, para quatro vazões de vazamento diferentes, nas faixas de densidade do óleo diesel, gasolina e GLP, pode ser visto que a relação entre a perda de pressão em relação à densidade dos fluidos é praticamente linear.

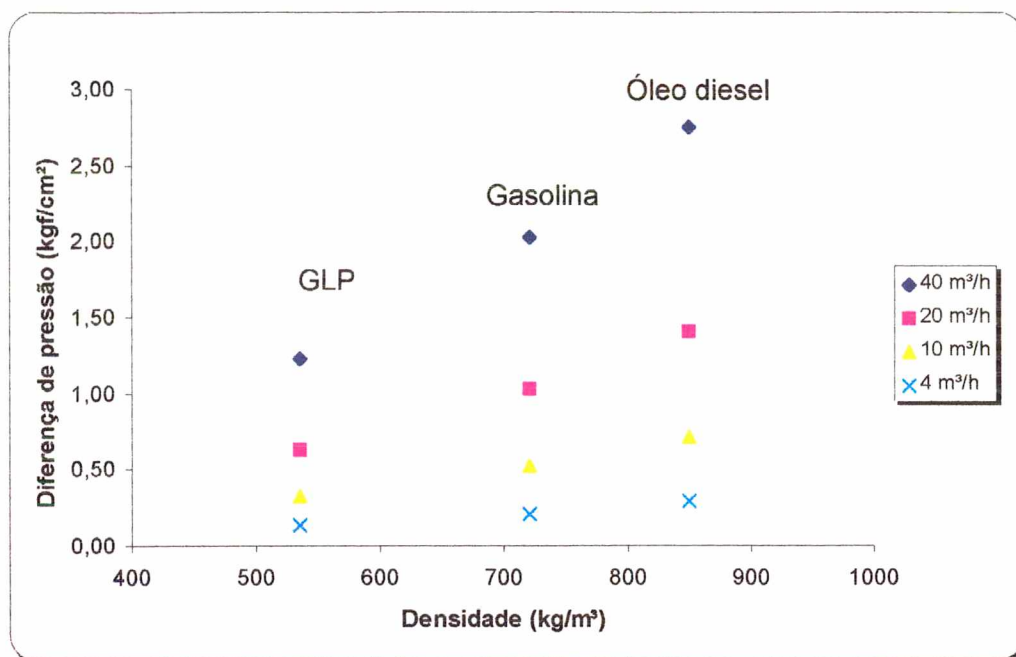


Figura 5.38 – Relação entre o tipo de fluido com a perda de pressão devido a vazamentos na posição 10 km

No caso da viscosidade, figura 5.39, não se observa a relação linear com a perda de pressão, observada para a densidade.

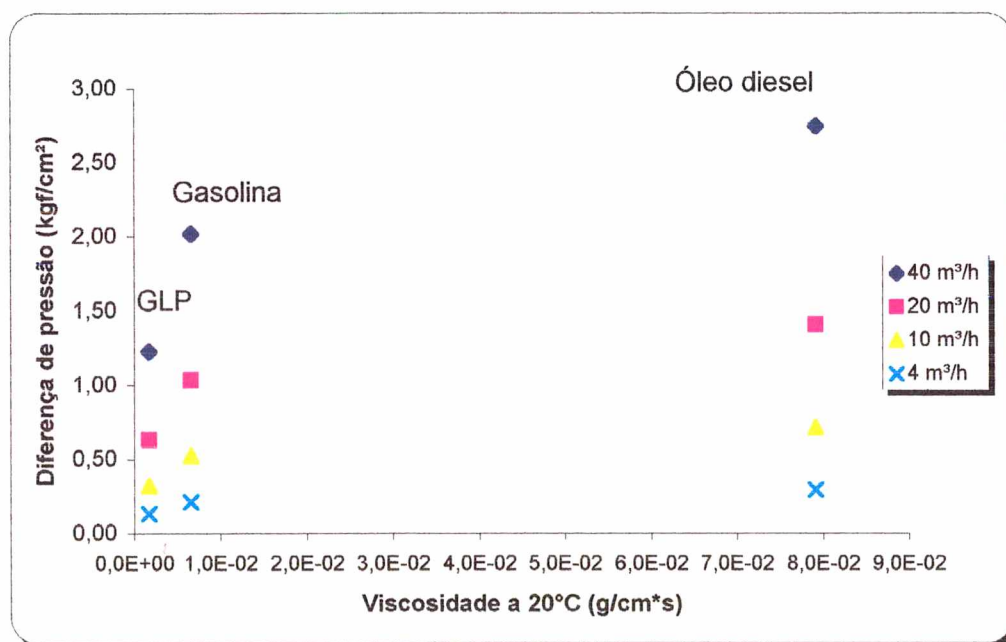


Figura 5.39 - Relação entre o tipo de fluido com a perda de pressão devido a vazamentos na posição 10 km

## **6 CONCLUSÃO**

O objetivo deste trabalho foi caracterizar os efeitos de um vazamento sobre a pressão de uma linha de escoamento de derivados de petróleo.

Foi possível obter um conjunto de curvas de comportamento da pressão para três fluidos, óleo diesel, gasolina e GLP. O estudo foi realizado sob várias posições de vazamento ao longo da tubulação, sendo elas 10, 15, 20, 30, 40 e 45 km. Essas posições incluem pontos de críticos do duto.

Também foi possível se fazer uma comparação de todos os comportamentos obtidos em quatro diferentes vazões vazadas, 4, 10, 20, 40 m<sup>3</sup>/h. Juntamente com essa análise, foram apresentadas curvas de aproximação às curvas dos dados simulados, obtidas através de um modelo dinâmico linear.

Além disso, foi apresentada uma análise relacionando a perda de carga com o tamanho de segmento de duto considerado e as vazões vazadas, onde foram obtidos os resultados esperados de acordo com a literatura.

A fim de caracterizar numericamente o comportamento da pressão nas diversas situações simuladas, efetuaram-se cálculos das constantes de tempo sendo que estes foram apresentados através de uma análise estatística simplificada, enfocando os máximos, mínimos, médias e também gráficos relacionando as constantes obtidas em um evento de vazamento específico com a densidade e viscosidade dos fluidos, sendo que estas apresentaram um comportamento possivelmente parabólico.

Nos vazamentos com diferentes fluidos verificou-se o comportamento aproximadamente constante do ganho em relação à vazão vazada, com pequenas variações para baixa vazão.

Por fim, constatou-se a linearidade da relação entre a densidade e a queda de pressão em decorrência do vazamento, e a não linearidade da relação entre a viscosidade e a perda de pressão.



Obteve-se um grande conjunto de dados de simulação com variações de vazamentos, com o qual se formou um banco de dados.

O trabalho aqui apresentado foi realizado através de um simulador de escoamento de líquidos, sendo todos os comportamentos apresentados provenientes desse simulador. Com isso, para a validação dos resultados encontrados é necessário fazer o mesmo estudo com outros simuladores e também com dados de campo.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode ser citada a análise do comportamento da pressão para outros transientes de operação normal, como partida e parada de bomba, sendo que a onda gerada em virtude da partida ou parada da bomba deve se misturar a onda de pressão originada devido ao vazamento.

Outra possibilidade seria o estudo dos efeitos provenientes de injeção de fluido, devido à alteração das propriedades do líquido escoando, como a densidade e viscosidade. Também se pode considerar o aspecto da interface gerada a partir do contato entre os fluidos com propriedades físicas diferentes, que são postos a escoar no mesmo duto.

A obtenção de curvas de aproximação que melhor se ajustam ao comportamento observado para o ganho estático, queda de pressão, constante de tempo em relação à densidade e viscosidade, seria de grande importância, pois assim se teria uma relação entre características mensuráveis dos efeitos do vazamento sobre o escoamento e as propriedades de transporte que caracterizam cada fluido.

## **7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

**API - Computational Pipeline Monitoring**, American Petroleum Institute – API, publication # 1130, first edition, October, 1995.

**API - Evaluation Methodology for Software Based Leak Detection Systems**, American Petroleum Institute – API, publication # 1155, first edition, February, 1995.

**BENNETT, C. O; MYERS, J.E. – Fenômenos de Transporte, quantidade de movimento, calor e massa**, Editora McGraw-Hill, 1978.

**BAPTISTA, R. M. – Leak Detection Systems for Low Complexity Pipelines – A Big Challenge**, Proceedings of ETCE & OMAE 2000, energy for the Millenium, New Orleans, LA, USA, 2000.

**BAPTISTA, R. M. – Leak Detection Systems for Short Pipelines**, Proceedings of International Pipeline Conference 2000, Calgary, Alberta, Canada, 2000.

**BAPTISTA, R. M. - Sistemas de Detecção de Vazamentos para Oleodutos de Baixa Complexidade - Preparando-se para Desafios Futuros**, 2º Seminário Brasileiro de Dutos,

**BUSSAB, O. W.; MORETTIN, P. A - Estatística básica**, Atual Editora, 1987.

**CRANE Technical Paper # 410, Flow of Fluids through Valves, Fittings and Pipe**, Crane Corporation, 4100, S. Kedzie Avenue, Chicago, IL60632, 1978

**DINIS, J.M.; SCOTT, S.L.; WOJTANOWICZ, A. - Leak Detection in liquid subsea flowlines with no recorded feed rate**, Proceedings of the ASME Energy Sources Technology Conference, Houston, USA, 1999.

ENERGY-SOLUTIONS INT., **SPS LeakFinder**. Texto disponível na internet.  
<http://www.energy-solutions.com/PROD/LP/lp-ld.html>, [05/02/2001].

FARMER, E. J. - **Method for Locating Leaks in a Fluid Pipeline and Apparatus Therefore**, United States Patent # 5,272,646, December, 21, 1993.

FARMER, E. J. - **System for Monitoring Pipelines**, United States Patent # 4,796,466, January, 10, 1989.

FARMER, E. J. – **Field Tests for New Leak Location System Successful**, Pipeline Industry, 1992.

FARMER, E. J.; KOHLRUST, R.; MYERS G.; VERDUZCO, G. – **Leak-detection tool undergoes field tests**, Oil & Gas Journal, 1988.

FARMER, E. J. – **Pipeline Leak Detection Under Four Extreme Conditions**, European Conference on Leak Prevention for Onshore and Offshore Pipelines, 1997.

LICENERGY - **Manual do usuário – Linqnet**, 1 junho 1998.

LIMA, L.R. - **Elementos de Engenharia Química**, Universidade Federal do Paraná, 1961.

LIOU C. P. - **Pipeline Variable Uncertainties and Their Effects on Leak Detectability**, American Petroleum Institute – API, publication # 1149, first edition, November, 1993.

LIOU, C. P. – **Physical Basis of Software-Based Leak Detection Methods**, International Pipeline Conference – Volume II, ASME 1998.

LIOU C. P.- **A Numerical Model for Transients in Petroleum Products Pipelines**, Numerical Methods for Fluid Transient Analysis, FED-Vol. 4, pp. 61-66, Applied Mechanics, Bioengineering, and Fluids Engineering



Conference, American Society of Mechanical Engineers, Houston, Texas, June 1983.

MACINTYRE A J., **Bombas e Instalações de Bombeamento**, 2ª edição, Guanabara Koogan, 1987.

MACTAGGART R.H., MYERS R.M. - **PC Based Leak Detection**. Texto disponibilizado por <http://www.simulations.com>, 1995.

MEYER, P. L.; **Probabilidade – Aplicações à Estatística**, 2º edição, Livros Técnicos e Científicos Editora, 1983.

WHALEY, R.S.; NICHOLAS, R.E; VAN REET J.D. - **Tutorial on Software Based Leak Detection Techniques**, Proceedings of the 24<sup>th</sup> Annual Pipeline Simulations Interest Group Meeting – PSIG, Corpus Christi, Texas, 1992.

RON CRAMER, STEPHEN BAILEY, ROBERTSON D. - **Shell Australia experience with a real time pipeline management software**, Pipeline & Gas Journal, Fevereiro 2000.

SIMULUTIONS, **State of the Art Software for Leak Detection and Batch Tracking**, Alberta, Canada. Texto disponível na internet. <http://www.simulations.com/products-leakwarn.html>, [11/12/2000].

SPIEGEL, M. R.; **Estatística**, Editora McGraw-Hill, 7ª Edição, 1974.

SPS, **Pipeline Leak Detection System**. Texto disponível na internet. <http://www.stoner.com>, [05/02/2001].

STREETER, V. L.; **Mecânica dos Fluidos**, Editora McGraw-Hill do Brasil, 1977.

TANNEHILL, J. C; ANDERSON, D. A ; PLETCHER, R.H. – **Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer**, Taylor & Francis Publishers – Second Edition, 1997

WYLIE, E. B.; STREETER, V.L.; **Fluid Transients**, Editora McGraw-Hill, 1978.

PETROBRAS, **Tabela de características físicas dos fluidos**, 2000.

PRAUZNITZ J. M., REID R. C., & SHERWOOD T. K., **The Properties of Gases and Liquids**, MacGraw Hill Book Company, third edition, 1977.